

A INFLUÊNCIA DA COR NA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE REVESTIMENTOS TÉRMICOS

BRUNO DANIEL GONÇALVES CARNEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

Coorientador: Engenheiro Luis Miguel Cardoso da Silva

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

“Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio previne-o”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Concluído este trabalho, quero expressar um especial agradecimento a todas as pessoas e entidades que devido à sua contribuição e apoio fornecido tornaram possível a sua realização. No entanto, destaco algumas cujo seu papel se tornou fundamental:

Ao meu orientador, o Professor Nuno Manuel Monteiro Ramos, gostaria de agradecer todo o incentivo, aconselhamento e acompanhamento continuo ao longo de todas as fases deste trabalho, bem como, a disponibilização dos meios imprescindíveis para a concretização da componente experimental.

À empresa “SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL” e aos seus colaboradores: Engenheiro Luís Silva e Eduardo Costa, agradeço o fornecimento dos materiais, respetivos dados técnicos e mão de obra para execução das amostras de ensaio. Toda a disponibilidade para me receberem nas suas instalações, explicarem passo a passo a forma de aplicação dos seus produtos, bem como, o voto de confiança para me envolverem na própria execução de todas as amostras.

À Engenheira Joana Maia agradeço por toda ajuda na elaboração da parte experimental, incluindo todas as horas despendidas ao sol a espalhar e fixar equipamentos de medição pelas amostras. Ao Engenheiro Pedro Pereira agradeço por toda a ajuda na aquisição dos equipamentos necessários à elaboração da componente experimental, bem como, toda a formação dada sobre os seus funcionamentos.

E por último, agradeço à minha família por todo o amor, força e motivação ao longo de todo este trabalho.

RESUMO

O aumento das preocupações energéticas dos edifícios, nomeadamente com as suas necessidades de aquecimento e arrefecimento, tem-se traduzido em alterações nas tecnologias construtivas. De facto, tem-se verificado uma utilização crescente nos edifícios de sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior (especialmente as constituídas por um reboco armado delgado sobre um isolante térmico – ETICS ou Sistema com Reboco Térmico). Estes sistemas procuram reduzir as trocas de calor entre o interior e exterior dos edifícios, apresentam inúmeras vantagens, mas também é importante conhecer as suas desvantagens e patologias frequentes no momento de decisão sobre a sua possível aplicação.

No presente trabalho procurou-se aprofundar o efeito que a radiação solar apresenta sobre diferentes camadas de revestimento final destes tipos de sistemas. Nomeadamente conhecer para cada tipo de revestimento final qual a sua refletância e absorptância solar, bem como saber de que forma estas influenciam as temperaturas superficiais atingidas.

A revisão do estado da arte encontra-se dividida em quatro partes distintas. Numa primeira parte, sistematizou-se os conhecimentos sobre este tipo de sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Numa segunda parte aprofundou-se os conhecimentos sobre absorptância e refletância solar, e avaliou-se as metodologias normalizadas e alternativas disponíveis para a determinação destas propriedades térmicas. Na terceira parte, sistematizou-se os conhecimentos sobre a avaliação da temperatura superficial, bem como os equipamentos disponíveis para a sua determinação. Na última parte, apresentou-se alguns trabalhos de investigação realizados sobre a medição destas propriedades térmicas, da temperatura superficial e dos seus efeitos sobre acabamentos superficiais.

O trabalho experimental realizado foi fragmentado em duas tarefas distintas. Uma das tarefas consistiu na medição “In Situ” da refletância solar de um conjunto de 11 amostras de ETICS e 2 amostras em Sistema com Reboco Térmico. A segunda tarefa consistiu na avaliação contínua das temperaturas superficiais atingidas por essas 13 amostras.

Apesar da componente experimental ser constituída por tarefas distintas procurou-se sempre estabelecer uma relação entre elas. De facto, possibilitou a confirmação de que quanto menor a refletância solar, e consequentemente maior a absorptância solar, maiores as temperaturas superficiais atingidas nessas amostras.

PALAVRAS-CHAVE: ETICS, Sistema com Reboco Térmico, Absortância Solar, Refletância Solar, Temperatura Superficial.

ABSTRACT

The increase of energetic concerns on buildings, especially in their heating and cooling needs, has resulted in changes in building technologies. In fact, there has been an increasing use in buildings facades of thermal insulation systems (ETICS or Thermal Rendering Systems). These systems which seek to reduce the heat exchange between the interior and exterior of buildings have many advantages, but it is also important to know their disadvantages and frequent pathologies at the moment of decision on its possible application.

Throughout this work was deepened the knowledge on the effects that solar radiation presents on different layers of final coat of these systems. In particular, to know for each type of final coating their solar reflectance and absorptance, as well as knowing how those thermal properties influence their surface temperature.

The state of art review was divided in four distinct parts. In the first part, it was systematized up the knowledge of thermal insulating systems applied in buildings facades. In the second part, the knowledge of solar absorptance and reflectance was deepened, and the standard and alternative methods available for the determination of these thermal properties was also evaluated. In the third part, was systematized up the knowledge on the evaluation of surface temperature and the equipment available for its determination. In the last part, some research conducted on the measurement of these thermal properties was presented, also regarding surface temperature and their effects on surface finishes.

The experimental work was spread in two distinct tasks. One of the tasks involved the measurement of solar reflectance, *"In Situ"*, of a set of eleven ETICS samples and two Thermal Rendering Systems samples. The second task was the evaluation of surface temperatures reached by these thirteen samples.

Although the experimental work is divided in two parts one important objective was to establish a relationship between them. In fact, it was possible to confirm that lower solar reflectance and higher solar absorptance will conduct to higher surface temperatures in the samples.

KEYWORDS: ETICS, Thermal Rendering Systems, Solar Absorptance, Solar Reflectance, Surface Temperature.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO	2
2. ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTOS	5
2.1. SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR	5
2.1.1. ETICS	5
2.1.1.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	5
2.1.1.2. REQUISITOS DO SISTEMA	6
2.1.1.3. ASPETOS GERAIS SOBRE A APLICAÇÃO DESTES SISTEMA	8
2.1.2. SISTEMA COM REBOCO TÉRMICO	10
2.1.3. VANTAGENS DESTES SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR	11
2.1.4. PATOLOGIAS DESTES SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR	11
2.2. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA E ABSORTÂNCIA SOLAR EM SUPERFÍCIES OPACAS	13
2.2.1. ENQUADRAMENTO	13
2.2.2. RADIAÇÃO SOLAR	14
2.2.3. CORES	15
2.2.4. MÉTODOS NORMALIZADOS DE MEDIÇÃO DE REFLETÂNCIA EM SUPERFÍCIES OPACAS	16
2.2.4.1. NORMA ASTM E903	16
2.2.4.2. NORMA ASTM C1549	17
2.2.4.3. NORMA ASTM E1918	18
2.2.5. MÉTODO ALTERNATIVO E1918A	19
2.2.6. PIRANÓMETROS	21
2.3. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL	24
2.3.1. GENERALIDADES	24
2.3.2. EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS	28

2.3.3. TERMOPARES	29
2.4. TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO SOBRE MEDIÇÕES “IN SITU”	31
2.4.1. MEDIÇÃO “IN SITU” DE RADIAÇÃO, REFLETÂNCIA E ABSORTÂNCIA SOLAR	31
2.4.2. MEDIÇÃO “IN SITU” DA TEMPERATURA SUPERFICIAL	36
2.4.3. EFEITO DA RADIAÇÃO E TEMPERATURA EM ACABAMENTOS DE SUPERFÍCIES	39
 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E MATERIAIS	 43
3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	43
3.1.1. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR DAS AMOSTRAS SEGUNDO O MÉTODO ALTERNATIVO E1918A	43
3.1.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS	44
3.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E AMOSTRAS DE ENSAIO	45
3.2.1. ENQUADRAMENTO	45
3.2.2. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS.....	48
3.2.2.1. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE ETICS	48
3.2.2.2. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DO SISTEMA COM REBOCO TÉRMICO	53
3.2.2.3. REVESTIMENTO FINAL DAS AMOSTRAS DE ETICS E SISTEMA COM REBOCO TÉRMICO	55
3.2.3. SISTEMA AUXILIAR DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS	57
3.3. INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL	59
3.3.1. PIRANÔMETRO SR05 DA HUKSEFLUX THERMAL SENSORS	59
3.3.2. TERMOPARES E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	61
3.3.3. ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LFC / FEUP	63
 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	 67
4.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES “IN SITU” DA RADIAÇÃO E REFLETÂNCIA SOLAR.....	67
4.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA TEMPERATURA SUPERFICIAL.....	68
4.2.1. PRIMEIRO ENSAIO EM CÂMARA CLIMÁTICA	68
4.2.2. ENSAIOS “IN SITU” DA TEMPERATURA SUPERFICIAL	71
4.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	85
 5. CONCLUSÕES	 87
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SÍNTESE CRÍTICA	87
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Esquema da constituição do ETICS	5
Fig. 2 – Pormenor construtivo do limite inferior do sistema (Freitas, 2002) e Perfil de Arranque (WEBER, 2015)	9
Fig. 3 – Pormenor construtivo das juntas de dilatação (Freitas, 2002).....	9
Fig. 4 – Esquema da constituição do Sistema com Reboco Térmico.....	10
Fig. 5 – Trocas de calor por radiação num material opaco.....	14
Fig. 6 – Espectro Eletromagnético e Espectro Solar (Dornelles, 2008)	15
Fig. 7 – Espectrofotómetro UV-VIS-NIR Lambda 750 da PerkinElmer (Perkin Elmer)	17
Fig. 8 – Refletómetro solar SSR-ER da D&S (D&S, 2009).....	17
Fig. 9 – Piranómetro LP02 da Adcon Telemetry (Adcon Telemetry)	18
Fig. 10 – Esquema de montagem do piranómetro (ASTM, 2015)	19
Fig. 11 – Comparação do espectro da radiação solar com as respostas espectrais do piranómetro de termopilha e do piranómetro de silício (Hukseflux).....	22
Fig. 12 – Esquema simplificado de um piranómetro (Hukseflux) e Piranómetro SPN1 com máscara de sombra (Delta-T Devices)	23
Fig. 13 – Albedómetro SRA01 da Hukseflux Thermal Sensors (Hukseflux).....	24
Fig. 14 – Perfil da variação de temperatura no tempo de uma parede plana.....	26
Fig. 15 – Pirómetro ST640 de radiação infravermelha (CALEX, 2008).....	28
Fig. 16 – Esquema de um Termopar.....	29
Fig. 17 – Esquema da metodologia de ensaio.....	44
Fig. 18 – Duas placas de EPS separadas	48
Fig. 19 – Misturadora elétrica.....	49
Fig. 20 – Aplicação do cimento-cola e união das placas de EPS.....	50
Fig. 21 – Reforço da ligação das placas de EPS com rede fibra-de-vidro	50
Fig. 22 – Sacos de 25kg do “weber.therm pro”.....	51
Fig. 23 – Mistura do “weber.therm pro” com a água	52
Fig. 24 – Espalhamento e regularização da argamassa.....	52
Fig. 25 – Aplicação da armadura e da regularização final da camada de base	52
Fig. 26 – Mistura do produto com água, sua aplicação e respetivo reforço com a rede fibra de vidro	53
Fig. 27 – Espalhamento da argamassa, aplicação da armadura e regularização final da camada de base	54
Fig. 28 – Exemplos de acabamentos do “weber.plast gran”.....	55
Fig. 29 – Aplicação do “weber.plast decor M” nas amostras de ensaio	56

Fig. 30 – “Weber.therm bucha SPIT” (LNEC, 2011; WEBER, 2015)	57
Fig. 31 – Realização dos furos das amostras com berbequim	57
Fig. 32 – Inserção do prego de expansão	58
Fig. 33 – Esquema de posicionamento das amostras no local de ensaio	58
Fig. 34 – Amostras no local de ensaio	58
Fig. 35 – Piranómetro SR05 da Hukseflux Thermal Sensors (Hukseflux)	59
Fig. 36 – Esquema da estrutura de suporte do piranómetro (medidas em cm).....	60
Fig. 37 – Estrutura de suporte do piranómetro.....	61
Fig. 38 – Mikromec Logger Multisens da Technetics	62
Fig. 39 – HOBO 4-Channel Thermocouple Data Logger da ONSET	63
Fig. 40 – Estação meteorológica do LFC / FEUP (LFC, 2009) e sua localização	63
Fig. 41 – Exemplo da informação apresentada aos utilizadores na página da internet (LFC, 2009) ...	65
Fig. 42 – Comparação entre os valores de absorção solar	68
Fig. 43 – Valores da temperatura medida pelos termopares	69
Fig. 44 – Valores da temperatura medida pelos termopares (sem os Tipo T N°3 e N°10).....	69
Fig. 45 – Valores da temperatura medida pelos termopares (sem os Tipo T N°3 e N°10 e sem os Tipo K que estão ligados ao “HOBO 10776534”).....	70
Fig. 46 – Valores da temperatura corrigidos pelo fator de correção	71
Fig. 47 – Valores da temperatura superficial (sem valores da “HOBO 10776534”).....	72
Fig. 48 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente do dia 20 a 30 de Maio de 2016	73
Fig. 49 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente dos dias 22 e 23 de Maio de 2016	74
Fig. 50 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_1 (1ª Etapa).....	75
Fig. 51 – Esquema de interpretação do indicador T_2	76
Fig. 52 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_2 (1ª Etapa).....	76
Fig. 53 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente do dia 31 de Maio a 6 de Junho de 2016	77
Fig. 54 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente entre as 10h00 do dia 31/05/2016 e as 11h50 do dia 03/06/2016	78
Fig. 55 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_1 (2ª Etapa).....	78
Fig. 56 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_2 (2ª Etapa).....	79
Fig. 57 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente do dia 7 a 9 de Junho de 2016	80
Fig. 58 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_1 (3ª Etapa).....	80

Fig. 59 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_2 (3ª Etapa)	81
Fig. 60 – Frequência acumulada das amostras de referência tendo por base o indicador T_1	82
Fig. 61 – Frequência acumulada das amostras de referência tendo por base o indicador T_2	83
Fig. 62 – Temperatura Ambiente e Radiação Solar Global atingidas durante todo o período experimental	84
Fig. 63 – Temperaturas das amostras com revestimento Preto [3500] e com revestimento Vermelho [0444].....	86
Fig. 64 – Comparação da absorvância solar com o $T_{95\%}$ e com o indicador T_2	86

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de termopares, respetivos intervalos de temperatura e vantagens	30
Quadro 2 – Cores e respetivos valores da refletância solar	31
Quadro 3 – Compilação de valores de absorptância publicados por diferentes autores	32
Quadro 4 – Valores da refletância solar de amostras pintadas com e sem verniz.....	32
Quadro 5– Valores da refletância solar de amostras novas e envelhecidas	33
Quadro 6 – Valores da refletância solar medidos pela norma ASTM E903 e ASTM C1549.....	34
Quadro 7 – Valores da refletância solar medidos pelos métodos ASTM E1918, E1918A e ASTM E903	35
Quadro 8 – Temperaturas das superfícies exteriores de dois edifícios medidos por câmara termográfica	36
Quadro 9 – Temperaturas superficiais médias em função da orientação	37
Quadro 10 – Refletância e Temperatura de algumas das amostras avaliadas	38
Quadro 11 – Temperaturas máximas dos provetes pintados com diferentes cores	38
Quadro 12 – Temperaturas das seis amostras.....	39
Quadro 13 – Dilatações térmicas de materiais utilizados em fachadas	40
Quadro 14 – Informações gerais das amostras de ensaio	46
Quadro 15 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm EPS”	48
Quadro 16 – Propriedades gerais sobre o “weber.col rapid”	49
Quadro 17 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm rede normal”	50
Quadro 18 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm pro”	51
Quadro 19 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm aislone”	54
Quadro 20 – Propriedades gerais sobre o “weber.plast gran”	55
Quadro 21 – Propriedades gerais sobre o “weber.plast decor”	56
Quadro 22 – Especificações do piranómetro SR05 da Hukseflux Thermal Sensors	59
Quadro 23 – Especificações dos termopares Tipo T	61
Quadro 24 – Especificações dos termopares Tipo K.....	62
Quadro 25 – Equipamentos da estação meteorológica	64
Quadro 26 – Valores da Refletância e Absortância Solar das Amostras	67
Quadro 27 – Média das temperaturas medidas pelos termopares Tipo T	70
Quadro 28 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95% de T_1 (1ª Etapa)	75
Quadro 29 – Valores do Indicador T_2 para o percentil 50% (1ª Etapa).....	77
Quadro 30 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95% de T_1 (2ª Etapa)	79

Quadro 31 – Valores do indicador T_2 para o percentil 50% (2ª Etapa).....	79
Quadro 32 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95% de T_1 (3ª Etapa)	81
Quadro 33 – Valores do indicador T_2 para o percentil 50% (3ª Etapa).....	81
Quadro 34 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95%	81
Quadro 35 – Valores do indicador T_2 para o percentil 50%	82
Quadro 36 – Valores médios da Temperatura Ambiente e Radiação Solar Global	84
Quadro 37 – Coefficient Variation of the Root Mean Square Error	84

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Acrónimos e Abreviaturas	Designação
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
Cu	Cobre
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DH	Documento de Homologação
EOTA	European Organisation for Technical Approvals
EPS	Poliestireno Expandido
ER	Essential Requirements
ETAG	European Technical Approvals Guidelines
ETICS	External Thermal Insulation Composite Systems
f.e.m.	Força Eletromotriz
FEUP	Faculdade de Engenharia e Universidade do Porto
LFC	Laboratório de Física das Construções
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Ni	Níquel
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RPE	Revestimento Plástico Espesso
r/c	Rés-do-chão
SI	Sistema Internacional de Unidades
SSR	Solar Spectrum Reflectometer
UV/VIS/NIR	Ultravioleta, Visível e Infravermelho Próximo
WMO	World Meteorological Organization

Símbolos	Unidade	Designação
α	-	Absortância Solar
A	m ²	Área
Bi	-	Número de Biot
ε	-	Emissividade

ρ	-	Refletância Solar
ρ_a	kg/m ³	Massa Volúmica Aparente
ρ_m	kg/m ³ ou g/cm ³	Massa Volúmica do material
h_c	W/(m ² .K)	Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção
h	W/(m ² .°C)	Condutância Térmica Superficial
F	-	Fator de Forma
HR	%	Humidade Relativa
I	W/m ²	Irradiância Solar
L	mm	Espessura
π	kg/(m.s.Pa)	Coeficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água
P	%	Precisão das medições do Piranómetro
q	W/m ²	Densidade do Fluxo de Calor
T, θ	K ou °C	Temperatura
T_1	°C	Indicador 1
T_2	-	Indicador 2
t	s, min, h ou dias	Tempo
μ	-	Fator de Resistência à difusão do vapor de água
U	W/(m ² .°C)	Coeficiente de Transmissão Térmica
λ	W/(m.°C)	Coeficiente de Condutibilidade Térmica
ΔL	m/m°C ⁻¹	Coeficiente de Dilatação Térmica Linear
ϕ_{\max}	mm	Granulometria Máxima
σ_c	kPa	Resistência à Compressão
τ	-	Número de Fourier
σ	W/(m ² .K ⁴)	Constante de Stefan-Boltzmann = 5,671x10 ⁻⁸

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Na sociedade de hoje em dia tem-se verificado um aumento significativo com preocupações energéticas, proteção ambiental e sustentabilidade nas construções. De facto, ao longo do tempo tem-se constado alterações nos requisitos que os edifícios devem cumprir, o que tem influenciado as suas tecnologias construtivas.

No que respeita a envolvente dos edifícios, constata-se grandes alterações nos sistemas construtivos entre os anos 40 e 90. Efetivamente, entre os anos 40 e 50 verificou-se uma transição de paredes de um só pano de alvenaria de tijolo maciço ou de pedra, com grandes espessuras, para fachadas duplas. Entre os anos 50 e 70 os panos destas paredes duplas foram sendo aligeirados com a utilização de alvenaria de tijolo vazado, com espessuras cada vez menores. Sendo o seu culminar nos anos 70 com paredes duplas de alvenaria de tijolo vazado, cujo os panos possuíam espessuras iguais e muito reduzidas (sendo uma má opção quer em termos acústicos quer em termos construtivos). Nos anos 80 voltou-se a construir as paredes duplas com panos de diferentes espessuras, sendo a maior no pano exterior, no entanto com a introdução de um novo elemento na sua caixa-de-ar, o isolamento térmico. Por último, nos anos 90 com a entrada em vigor do RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) verificou-se uma preocupação crescente com o tratamento das pontes térmicas. O que levou de uma forma geral e quando possível, à transição do isolamento térmico para o exterior das fachadas (Freitas, 2002).

Tendo presente o objetivo de reduzir as necessidades de aquecimento/arrefecimento (diminuindo as trocas de calor das construções com o exterior) e dos riscos de ocorrência de condensações, vai-se no presente trabalho apresentar os subseqüentes sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior:

- ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems)
- Sistema com Reboco Térmico

Por outro lado, tendo por base esses sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior importa também conhecer como ocorrem as trocas de calor entre o exterior e o interior dos edifícios. Sendo que, a radiação solar tem um peso considerável nestas trocas. De facto, o comportamento dos materiais que compõem estes sistemas quando expostos à radiação solar, especialmente a camada de revestimento final, é relevante na avaliação do comportamento térmico da envolvente dos edifícios. Torna-se assim importante avaliar propriedades térmicas como a refletância solar (ρ) e absortância solar (α) destes sistemas, bem como, as temperaturas superficiais por eles atingidas. Sendo que, quanto maior a refletância solar destes sistemas menores as trocas de calor com o interior dos edifícios e menor a quantidade de calor acumulado na fina camada de revestimento final (sendo as temperaturas superficiais

atingidas menores). O que permite também reduzir a ocorrência de fissurações e degradação prematura destes sistemas.

A necessidade de conhecer propriedades térmicas, como a refletância e absorvância solar, dos diferentes revestimentos finais aplicados sobre estes tipos de sistemas e compreender a sua influência sobre as temperaturas superficiais alcançadas motivou o desenvolvimento da componente experimental deste trabalho.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho consiste na avaliação da absorvância solar de diferentes revestimentos finais aplicados sobre sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior e avaliar também a sua relação com as temperaturas superficiais por eles atingidas. Seguidamente sintetizam-se um conjunto de objetivos parcelares que possibilitam alcançar este objetivo principal:

- Conhecer os sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior (ETICS e Sistema com Reboco Térmico) e as metodologias e equipamentos existentes para determinação de propriedades térmicas (refletância e absorvância solar) dos revestimentos finais aplicados nestes sistemas;
- Conhecer as tecnologias de aplicação de ETICS e Sistemas com Reboco Térmico, com ênfase no acabamento superficial;
- Implementar um procedimento de ensaio sobre amostras de revestimentos térmicos com diferentes acabamentos superficiais;
- Avaliar por medição “*In Situ*” a refletância solar das amostras com diferentes acabamentos superficiais;
- Avaliar por medição “*In Situ*” as temperaturas superficiais atingidas por cada uma das amostras;
- Avaliar os efeitos que os “cool pigments” introduzem nos revestimentos finais, no que respeita a absorvância solar e temperatura superficial;

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

A presente dissertação está dividida nos seguintes capítulos:

- O Capítulo 1 apresenta os capítulos seguintes e sintetiza os principais objetivos deste trabalho;
- O Capítulo 2 sintetiza o estado da arte e fundamentos teóricos sobre o comportamento de fachadas com revestimentos térmicos quando expostas à radiação solar. Em primeiro lugar, descreve-se dois tipos destes sistemas (ETICS e Sistema com Reboco Térmico), bem como, as suas vantagens e patologias frequentes. Em segundo lugar, sintetiza-se os princípios teóricos sobre a refletância solar, a absorvância solar e respetivas metodologias experimentais para a sua medição. Em terceiro lugar, avalia-se as metodologias e equipamentos para a determinação das temperaturas superficiais destes tipos de revestimentos. Por último, resume-se ainda o trabalho realizado por alguns autores no domínio da medição de refletância, de absorvância solar e de temperaturas superficiais;
- O Capítulo 3 descreve toda a metodologia experimental e amostras de ensaio. Estando dividido em três componentes, neste capítulo começa-se por sintetizar as metodologias de ensaio que serão utilizadas. De seguida é descrito detalhadamente todos os materiais

utilizados, suas características e procedimento para a realização das amostras de ensaio. Por último, apresenta-se toda a infraestrutura experimental necessária e suas propriedades;

- No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais. Este capítulo é assim dividido em três partes, numa primeira parte são apresentados os resultados das medições “*In Situ*” da refletância solar, numa segunda parte os resultados das medições da temperatura superficial e numa terceira parte é realizada uma discussão dos resultados;
- O Capítulo 5 sintetiza as principais conclusões retiradas com a elaboração deste trabalho e perspectiva desenvolvimentos futuros nesta área de investigação.

2

ESTADO DA ARTE E
FUNDAMENTOS

2.1. SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR

2.1.1. ETICS

Segundo o documento “Guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems (ETICS) with rendering”, o ETICS corresponde a um sistema constituído por isolamento térmico pré-fabricado que é aplicado sobre um suporte (paredes de betão ou alvenaria) e revestido por um reboco armado materializado em uma ou várias camadas, que posteriormente é recoberto por uma camada de primário (caso exista) e pelo revestimento final (EOTA, 2013). Na Fig. 1 pode-se observar esquematicamente toda a constituição deste sistema.

2.1.1.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

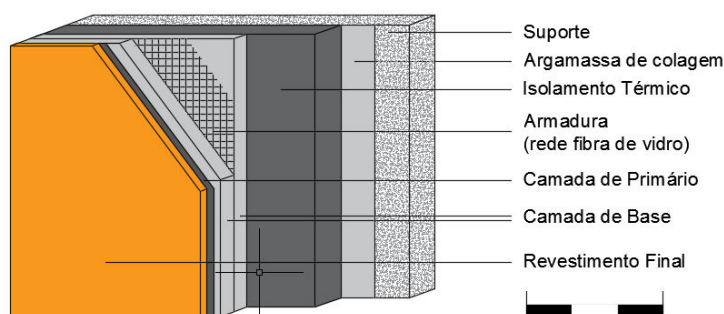


Fig. 1 – Esquema da constituição do ETICS

O suporte onde o ETICS vai ser aplicado deve ser uma superfície plana e vertical, sendo ainda possível aplicar-se em superfícies horizontais ou inclinadas desde que não estejam expostas à precipitação. O suporte do sistema pode ser em alvenaria (de tijolo, blocos de betão, pedra, ...) ou em betão (painéis pré-fabricados, betão de inertes correntes ou leves, ...). Pode ainda ser aplicado em suportes pintados, com revestimentos orgânicos ou minerais, desde que devidamente preparados. A fixação do isolamento térmico ao suporte pode ser materializada por colagem (em pontos, bandas ou completa com talocha dentada), de forma mecânica (perfis metálicos, cavilhas ...) ou por ambas:

- Colagem complementada com fixação mecânica para providenciar estabilidade enquanto a cola não seca e atuando como uma conexão temporária, que evita o risco de queda em caso de descolagem. Fornece ainda estabilidade em caso de incêndio;

- Fixação mecânica complementada com colagem que assegura a planeza do sistema;

Quando utilizada a fixação por colagem utiliza-se geralmente um produto pré-preparado que pode ser fornecido em pó (sendo apenas necessário adicionar água ou misturar com ligante) ou em pasta (sendo necessário adicionar 30% em peso de cimento Portland). Podendo também ser já fornecido com a consistência desejada em pasta ou em latas de espuma sendo só aplicar (EOTA, 2013).

O isolamento térmico corresponde à componente do sistema responsável pelo aumento da resistência térmica do suporte no qual é aplicado, sendo o EPS um dos mais utilizados. Note-se que, a resistência térmica do ETICS deve ser no mínimo de $1 \text{ m}^2 \cdot \text{k}/\text{w}$. Trata-se de um produto pré-fabricado que é fornecido em placas, com contorno plano ou com entalhe, e que deve ser dimensionado (à compressão, estabilidade, permeabilidade ao vapor, comportamento à água e mecânico) com o intuito de determinar a espessura a ser adotada (EOTA, 2013; Freitas, 2002).

Sobre o isolamento térmico é aplicada uma camada de base que consiste numa argamassa armada de reboco de pequena espessura (na ordem dos 3 mm) materializada em sucessivas passagens. Esta argamassa geralmente é idêntica ao produto de colagem utilizado para fixar o isolamento térmico ao suporte. A armadura que usualmente é incorporada entre a camada de base é rede fibra-de-vidro, deve possuir um tratamento de proteção antialcalino, devido ao pH alto da camada, e na zona das juntas das placas opta-se pela sua sobreposição. Estas armaduras podem ser de dois tipos: normais (principal função é melhorar a resistência mecânica da camada e garantir a sua continuidade) e reforçadas (adicionadas às armaduras normais como forma de melhorar a resistência ao choque) (EOTA, 2013).

O primário é posteriormente aplicado sobre a camada de base sendo a sua função melhorar a aderência da camada de revestimento final. Trata-se de uma pintura à base de resinas em solução aquosa de cor opaca e deve-se garantir sempre a sua compatibilidade com a alcalinidade da camada de base. Note-se que nem sempre é aplicado o primário (Freitas, 2002).

A última camada a ser aplicada é o revestimento final. Este é responsável pelo aspeto do ETICS e protege o sistema dos agentes atmosféricos. Segundo o documento ETAG 004 da EOTA (2013) podem ser aplicados nestes sistemas diferentes tipos de revestimentos finais:

- Revestimento plástico espesso (RPE) – trata-se de um revestimento colorido fornecido em pasta, semelhante a uma argamassa e pronto a aplicar (espessuras entre 1 e 2,5 mm) com uma talocha lisa de inox. Os RPE são constituídos por cargas minerais, dispersão aquosa de resinas, pigmentos, agentes antifúngicos, algicidas e aditivos específicos. Este tipo de revestimentos são dos mais utilizados;
- Revestimento por pintura com tintas;
- Revestimentos minerais coloridos (silicatos ou de cimento);
- Ladrilhos cerâmicos (em estudo pois este tipo de acabamento não está previsto na ETAG 004 e não possui DH) – Segundo “O guia 2015 WEBER” este tipo revestimento não deve ser aplicado em grandes alturas (inferior a 28 m), deve ter um peso inferior a $30 \text{ kg}/\text{m}^2$, as placas de isolamento térmico do sistema devem ser de maior densidade, devem ser fixadas mecanicamente (pelo menos em 6 pontos) e complementadas com colagem adicional. (Fernandes, Brito e Cruz, 2016; WEBER, 2015)

2.1.1.2. REQUISITOS DO SISTEMA

Tendo por base o documento da EOTA (2013) vai-se apresentar seguidamente os requisitos essenciais que o ETICS deve satisfazer para poder ser comercializado e aplicado:

- **ER1 – Resistência mecânica e estabilidade:** os requisitos de resistência mecânica e estabilidade das componentes não resistentes estão incluídos no ER4 – Segurança na utilização;
- **ER2 – Segurança em caso de incêndio:** a reação ao fogo do ETICS deve estar em conformidade com a legislação, os regulamentos e as disposições administrativas aplicáveis ao edifício. Por outro lado, em caso de incêndio no local de construção onde o sistema vai ser aplicado deve-se garantir que a propagação de fogo e fumo seja limitada, que os trabalhadores consigam abandonar o local de forma segura, a propagação de fogo para as edificações vizinhas seja limitada e deve-se ter em consideração a segurança das equipas de socorro;
- **ER3 – Higiene, saúde e ambiente:**
 - Ambiente interior: o sistema deve impedir a passagem da humidade exterior para o interior, evitar a existência de condensações intersticiais e nas superfícies interiores. Sendo que, quando no interior dos edifícios exista elevada produção de vapor de água devem ser tomadas precauções adequadas. As paredes devem ainda impedir a penetração da humidade do solo, da água da chuva e neve nas construções. Por outro lado, o ETICS deve ainda preservar as suas propriedades quando submetido a choques causados pela circulação e utilização normal (quer sejam acidentais ou propositados) e possibilitar o apoio de equipamentos de manutenção sem que ocorra a sua rotura ou perfuração do reboco. Para finalizar, o sistema e as suas componentes são avaliados quanto à sua absorção e permeabilidade à água, resistência aos impactos, permeabilidade ao vapor de água e características térmicas;
 - Ambiente exterior: a instalação e trabalhos de construção não devem libertar poluentes para o ambiente (solo, água e ar). Sendo a taxa de libertação desses poluentes em função da legislação, dos regulamentos e disposições administrativas dos locais onde o sistema é aplicado;
- **ER4 – Segurança na utilização:** apesar de o ETICS não possuir funções estruturais é exigido que possua resistência mecânica e estabilidade. De facto, deve suportar o seu peso próprio sem deformações prejudiciais, os normais movimentos da estrutura não devem provocar fissuras nem perda de adesão no ETICS, deve aguentar movimentos devido às temperaturas e devido à ação do vento, e deve ainda apresentar resistência a forças de pressão, sucção e vibração;
- **ER5 – Proteção contra o ruído:** este requisito não é considerado pois em termos de proteção contra o ruído as exigências que se deve satisfazer são relativas á envolvente completa, isto é, conjunto do ETICS com a parede e considerando as aberturas existentes, tais como janelas, portas, entre outras;
- **ER6 – Economia de energia e retenção de calor:** o ETICS vai permitir uma economia da energia uma vez que, melhora o isolamento térmico do edifício e permite no Inverno reduções nas necessidades de aquecimento e no Verão das necessidades de arrefecimento. Torna-se assim necessário conhecer a resistência térmica do sistema para que posteriormente possa ser utilizada nos cálculos térmicos requeridos pela regulamentação (REH). Sendo ainda importante referir que se deve garantir que as fixações mecânicas ou complementadas por estas não reduzam a resistência térmica do conjunto, uma vez que, podem originar diferenças localizadas de temperatura;
- **Durabilidade:** em termos da durabilidade do ETICS importa referir que todos os requisitos essenciais anteriormente mencionados e as propriedades dos seus componentes devem ser satisfeitas ao longo de toda a sua vida útil nas condições normais de utilização e

manutenção. O sistema deve ser estável à temperatura (sem apresentar deformações destrutivas ou irreversíveis), humidade e retração. Devem ainda ser adotadas medidas preventivas para evitar fissurações ao nível das juntas de dilatação e pontos singulares (ligação com janelas).

2.1.1.3. ASPETOS GERAIS SOBRE A APLICAÇÃO DESTE SISTEMA

Antes de se iniciar os trabalhos de aplicação do ETICS deve-se primeiro analisar cuidadosamente o suporte. Assim sendo, deve-se garantir que este não apresente poeiras, produtos de descofragem, humidades, que a sua superfície seja plana, sem grandes irregularidades e desníveis (devem ser inferiores a 1 cm sob uma régua com 20cm). Caso contrário deve-se regularizar o suporte com reboco compatível com o sistema. Em construção nova caso o suporte seja de betão deve-se esperar um período de secagem de pelo menos 45 dias e para as alvenarias de 30 dias antes de aplicar o sistema. Por outro lado, tratando-se de reabilitação de fachadas deve-se garantir que o suporte é estável e caso tal se verifique deve-se ainda procurar pela:

- Existência de fissuras, que quando apresentem largura superior a 2 mm devem ser tratadas;
- Zonas onde o reboco apresente falta de aderência, sendo necessário remove-lo dessas zonas e preencher novamente;
- Tratando-se de suportes de betão analisar se existem zonas degradadas pela corrosão de armaduras. Caso existam devem ser reparadas com produtos compatíveis com o produto de colagem do sistema;
- Caso o suporte esteja pintado ou possua revestimentos orgânicos, estes devem ser removidos por decapagem;
- Caso o suporte tenha revestimento cerâmico deve-se verificar a sua aderência, removendo as zonas com défice desta.

Após a preparação do suporte para a aplicação do sistema estar efetuada deve-se ainda realizar ensaios de aderência (Freitas, 2002).

Posteriormente à preparação do suporte pode-se então proceder à aplicação do ETICS. Sendo que, estes trabalhos só devem ser realizados caso não se verifique períodos de precipitação (expeto em zonas abrigadas ou quando se utilizem andaimes cobertos), ventos fortes, temperaturas baixas (inferiores a 5°C e sendo sempre necessário verificar o tempo de presa da cola) ou altas, como as verificadas em superfícies expostas ao sol no Verão. Cumpridas estas condições climatéricas podem-se iniciar os trabalhos de aplicação do sistema. Com base no documento de Freitas (2002) apresenta-se seguidamente algumas recomendações:

- 1º - Iniciar a montagem dos seus perfis de arranque. A sua espessura estará condicionada pelas placas de isolamento térmico e serão aplicados horizontalmente no limite inferior da fachada, como se pode observar na Fig. 2. A sua fixação será materializada com parafusos, colocados a menos de 5 cm das extremidades e afastados entre si no máximo por 30 cm. Entre perfis deve-se garantir um espaço de 2 a 3 mm, possibilitando movimentos de dilatação, e deve-se realizar o reforço com rede fibra-de-vidro nessas juntas. Seguindo os mesmos princípios, montam-se também os perfis laterais;

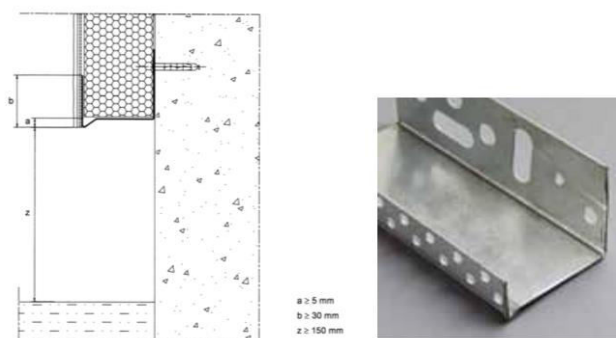


Fig. 2 – Pormenor construtivo do limite inferior do sistema (Freitas, 2002) e Perfil de Arranque (WEBER, 2015)

- 2º - Iniciar a preparação do produto de colagem. Deve-se respeitar rigorosamente as dosagens definidas pelo fabricante e a mistura só deve ser aplicada passados 5 a 10 minutos da sua preparação;
- 3º - O produto de colagem deve ser aplicado nas placas de isolamento e não deve ser usado para preenchimento de espaços entre elas. Tal como se referiu anteriormente, essa colagem pode ser parcial por pontos ou bandas, ou contínua com talocha denteada;
- 4º - A colagem dessas placas no suporte devem ser com juntas desencontradas nos cantos e zona corrente. A sua colocação inicia-se pelos perfis de arranque em fiadas horizontais e coladas topo a topo. Deve-se verificar permanentemente a regularidade da superfície, as juntas entre placas com mais de 2 mm de espessura deverão ser preenchidas com o material de isolamento e é necessário deixar uma folga de 5 mm no encontro do sistema com saliências da fachada, caixilharias ou peitoris, que será preenchida com mástique. Deve-se ainda interromper o sistema nas juntas de dilatação e evitar desníveis entre placas, como se pode observar na Fig. 3;

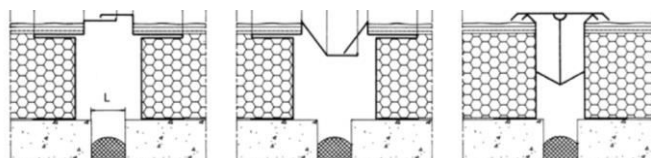


Fig. 3 – Pormenor construtivo das juntas de dilatação (Freitas, 2002)

- 5º - Realizar o reforço dos pontos singulares: colocação de cantoneiras de reforço nas arestas do sistema e reforçar os cantos dos vãos com faixas de 0,3 x 0,3 m de rede fibra-de-vidro;
- 6º - A camada de base armada deve ser executada logo após a secagem do produto de colagem do isolamento térmico, evitando assim a degradação superficial dessas placas. Esta camada deve ser executada em subcamadas e consoante o grau de exposição aos choques pode ser reforçado com uma ou duas armaduras normais, ou com armadura reforçada. Deve-se garantir uma sobreposição de aproximadamente 10 cm nas emendas das armaduras e nunca aplicar diretamente a armadura sobre as placas de isolamento;
- 7º - Recomenda-se ainda a aplicação de uma camada de primário antes de aplicar a camada de acabamento.

2.1.2. SISTEMA COM REBOCO TÉRMICO

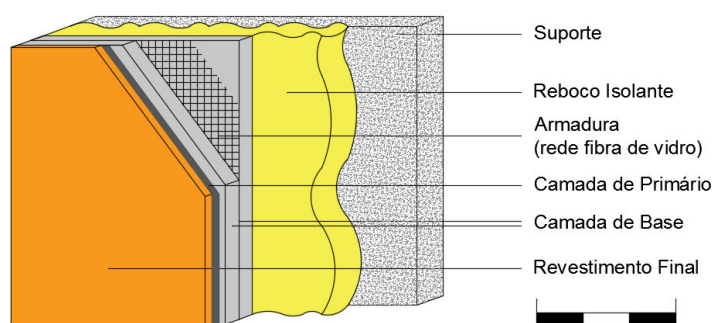


Fig. 4 – Esquema da constituição do Sistema com Reboco Térmico

O Sistema com Reboco Térmico é constituído por várias camadas, como se pode observar pela Fig. 4. Tal como o ETICS, este sistema pode ser aplicado em suportes de alvenaria (de tijolo, blocos de betão, pedra, ...), de betão (painéis pré-fabricados, betão de inertes correntes ou leves, ...), suportes pintados, com revestimentos orgânicos ou minerais. No entanto, esses suportes devem ser sempre previamente preparados. A título de exemplo: deve-se eliminar as poeiras e resíduos das superfícies, que devem ser planas e estáveis; no caso de o suporte ser em reboco de cimento ou betão liso deve-se previamente aplicar uma camada de chapisco, realizada com o reboco isolante e só depois aplicar a camada de isolamento; em fachadas antigas com fraca coesão da superfície deve-se aplicar primeiro uma solução consolidante; e em paredes com irregularidades superficiais grandes deve-se aplicar uma camada de consolidação (WEBER, 2015).

A grande diferença entre estes dois sistemas está na camada de isolamento térmico, uma vez que, no ETICS esta é materializada com placas pré-fabricadas (usualmente EPS, podendo também ser usadas placas de XPS, aglomerado de cortiça ou lã de rocha) e no Sistema com Reboco Térmico esta camada corresponde a uma argamassa termo isolante aplicada por projeção no suporte. A espessura desta argamassa, de baixa condutibilidade, deve ser dimensionada e pode variar entre 30 mm e 80 mm. No entanto, para espessuras elevadas deve ser realizada em várias camadas, uma vez que, a espessura máxima de cada uma é de 40 mm e o tempo de espera entre elas de 12 a 24 horas. Esta camada de isolamento térmico deve ser sempre revestida esperando pelo menos 1 dia por cada cm da sua espessura (WEBER, 2015).

As camadas seguintes deste sistema e sua metodologia de aplicação são em tudo semelhantes às do ETICS. Assim sendo, vai-se aplicar sobre o isolamento térmico uma camada de base, realizada em argamassa cimentícia monocomponente de pequena espessura, reforçada com rede de fibra-de-vidro com proteção antialcalina. Posteriormente, aplica-se uma camada de primário como forma de melhorar a aderência da camada de revestimento final. Por último, aplica-se o revestimento final que usualmente corresponde a uma pasta plástica espessa com uma grande variedade de cores disponíveis (WEBER, 2015).

No que respeita à aplicação deste sistema, como já foi referido recomenda-se a preparação prévia do suporte. Em relação à camada de isolamento térmico não é aconselhável a sua aplicação sob chuva, ventos fortes, muito sol (ideal é entre os 5 e 30 °C), suporte com gelo, em degelo, risco de gelar ou com acumulação de água. Por outro lado, esta argamassa térmica tem de ser desligada dos elementos da fachada rígidos (pilares, varandas, peitoris, ...) por uma junta de 5 mm preenchida com material do tipo mástique; respeitar as juntas de dilatação adotando soluções específicas para a sua execução; e em zonas

enterradas ou contato com o solo, antes de realizar a camada de base armada deve-se materializar em toda a superfície exposta uma impermeabilização exterior da argamassa termo isolante. As recomendações para as restantes camadas são semelhantes às anteriormente apresentadas para o ETICS.

2.1.3. VANTAGENS DESTES SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR

Após apresentar dois sistemas diferentes de isolamento térmico de fachadas pelo exterior expõe-se algumas das vantagens da sua aplicação que os tornam como soluções viáveis e de alta qualidade. Assim sendo:

- Estes sistemas garantem uma continuidade do isolamento térmico das fachadas dos edifícios, tornando-os como soluções ideais para tratar as pontes térmicas planas (zonas em que a resistência térmica é bastante diferente da zona corrente). Conseguindo-se assim para o mesmo coeficiente de transmissão global da envolvente utilizar espessuras menores de isolamento térmico. Por outro lado, consegue-se também obter o mesmo coeficiente de transmissão global da envolvente com paredes menos espessas, o que se traduzirá num aumento da área habitável e numa redução das cargas permanentes que atuam na estrutura, uma vez que se diminuiu o seu peso próprio. A título de exemplo, a substituição de uma parede dupla com isolamento na caixa de ar por uma parede simples com isolamento pelo exterior;
- Ao isolar as fachadas pelo exterior vai-se contribuir para o aumento da sua inércia térmica, já que se está a aumentar a massa para o interior desse isolamento, provocando assim uma melhoria do conforto térmico de Verão e de Inverno. De facto, no Verão consegue-se uma maior capacidade de regular a temperatura interior, onde as paredes vão absorver o calor nas horas mais quentes do dia e restituir durante a noite, e de Inverno verifica-se um aumento dos ganhos solares úteis. Isto contribuirá para uma diminuição das necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício e como tal numa melhoria da eficiência energética dos edifícios;
- Consegue-se também um melhoramento da impermeabilidade e durabilidade das fachadas exteriores face à ação dos agentes atmosféricos e climatéricos, e protege-se as camadas interiores da fachada de grandes variações de temperatura;
- Diminuição do risco de ocorrência de condensações (internas e superficiais);
- Tratam-se de sistemas cuja aplicação, transporte e manuseamento é simples e onde se pode obter uma grande diversidade de cores e texturas de revestimento final, abrangendo assim os diferentes gostos pessoais. No caso de reabilitação, pode ainda ser aplicado enquanto o edifício é utilizado pelos seus moradores.

Para concluir, este tipo de sistemas de isolamento térmico pelo exterior tanto pode ser utilizado em construção nova como em reabilitação. No entanto, é preciso ter em atenção que nem sempre é possível ser aplicado em reabilitação, como por exemplo quando se tem muitas reentrâncias ou não se consegue garantir a continuidade do isolamento térmico. Porém, como se viu anteriormente, quando possível de ser aplicado acarreta inúmeras vantagens levando essas fachadas reabilitados ao encontro do cumprimento dos requisitos definidos pelo REH (Freitas, 2002).

2.1.4. PATOLOGIAS DESTES SISTEMAS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE FACHADAS PELO EXTERIOR

Atualmente existem no mercado diferentes sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior, tendo-se a título de exemplo os dois anteriormente apresentados: ETICS e Sistema com Reboco

Térmico. Apesar das grandes vantagens da implementação destes sistemas nos edifícios também se torna relevante considerar previamente as suas desvantagens, nomeadamente as patologias que habitualmente surgem. Sendo que, algumas destas patologias podem ser evitadas, uma vez que, se devem essencialmente ao incumprimento dos procedimentos recomendados para sua aplicação. A título de exemplo, mudanças nas características do reboco e cola (alteração das dosagens, adição de água desnecessária, ...), e aplicação em condições ambientais desfavoráveis (temperaturas muito altas ou baixas). Vai-se então seguidamente apresentar algumas dessas patologias recorrentes.

Assim sendo, começa-se por referir uma das patologias frequentes nestes sistemas que é a degradação do aspeto exterior causadas pela colonização biológica. O desenvolvimento destes microrganismos (algas, fungos e líquenes) nas fachadas dos edifícios é proporcionado quando a sua temperatura superficial é mais baixa que a temperatura ponto de orvalho, ou seja, quando ocorrem as condensações superficiais. Sendo mais propício nos períodos noturnos, uma vez que, as trocas de radiação por onda longa não é compensado pela radiação de onda curta proveniente do sol. Note-se que esta patologia não provoca mudanças no desempenho mecânico e térmico dos sistemas, apenas um aspeto degradado das fachadas (Barreira, 2012).

Outras patologias frequentes neste tipo de sistemas são os fenómenos de destacamento, empolamento e descolagem. De facto, quando o sistema é aplicado em condições adversas, ou não se cumpre os tempos de secagem, ou não se aplica a camada de primário, ou o reboco é aplicado sobre placas de isolamento degradadas pode-se verificar um empolamento ou destacamento do revestimento final ou do próprio reboco. Por outro lado, quando o suporte não é devidamente preparado (devido à presença de sujidade, produtos descofragem, de água, gelo ou revestimentos orgânicos não decapados) pode-se verificar a descolagem generalizada e respetiva queda do sistema. Por último, quando é aplicado em condições ambientais adversas, ou a repartição da cola e respetiva colagem das placas no suporte é insuficiente, ou ocorrem infiltrações devido a deficiente tratamento dos pontos singulares pode-se verificar uma descolagem parcial do sistema (Freitas, 2002).

A fissuração é também uma das patologias recorrentes neste tipo de sistemas. Poderá ser causada por diversos fatores, dentro dos quais se destacam: aplicação de reboco em condições atmosféricas adversas, ausência de juntas ou a sua incorreta localização, emprego de reboco entre as placas de isolamento, camada de base com variações de espessura ou com espessura insuficiente, aplicação da armadura diretamente sobre as placas de isolamento ou com sobreposição insuficiente nas emendas, ausência de reforços nos vãos com armadura, uso de cores escuras ou grandes contrastes de cores, entre outros. Ou seja, tal como as patologias de destacamento, empolamento e descolagem, também as fissurações se devem essencialmente a falhas na conceção, ou incorreta aplicação pela mão-de-obra ou a condições atmosféricas adversas durante a sua aplicação (Freitas, 2002).

Importa também referir a reduzida resistência ao choque destes sistemas. De facto, quando aplicados em zonas acessíveis pode-se verificar a sua degradação devido a choques fortuitos ou de vandalismo, que além de esteticamente ser desagradável pode ser um ponto frágil para a ocorrência de infiltrações de água (Barreira, 2012).

Por último, referem-se as anomalias do aspeto do revestimento final tais como: falta de planeza, heterogeneidade na textura e cor dos revestimentos, a descoloração e a demarcação nessa camada das juntas entre placas de isolamento. Tal como na patologia de colonização biológica, também estas anomalias não afetam o comportamento térmico e mecânico do sistema. Poderão dever-se essencialmente à aplicação em condições ambientais adversas sem proteção contra as intempéries, inexistência da camada de primário, quantidade insuficiente de revestimento final para disfarçar as irregularidades, entre outros.

Estas patologias apresentadas são das mais recorrentes nestes tipos de sistemas, no entanto existem mais anomalias que possam surgir. Sendo assim, destaca-se a existência do “Grupo de Estudos da Patologia da Construção – PATORREB” que procurando sistematizar a informação nesta área possui um registo grande de patologias (não só destes sistemas, mas da construção em geral). Sendo que, em cada ficha de patologia tem-se a sua descrição, as causas, sondagens e medidas realizadas e recomendações.

2.2. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA E ABSORTÂNCIA SOLAR EM SUPERFÍCIES OPACAS

2.2.1. ENQUADRAMENTO

Um edifício apresenta uma grande diversidade de materiais de construção, porém os que constituem a sua envolvente têm uma grande importância no seu desempenho térmico e energético. De facto, as trocas de calor (condução, radiação e convecção) entre o interior e o exterior devido às características dos materiais da envolvente podem prejudicar muito o desempenho dos edifícios. A título de exemplo, pode-se originar um aumento significativo dos ganhos solares que levará a um sobreaquecimento. Conduzindo assim a possíveis situações de incumprimento das regulamentações em vigor, tais como o REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação).

Por outro lado, em relação às trocas de calor que ocorrem por radiação, o sol apresenta-se como uma das principais fontes de radiação que incide sobre as construções (sob a forma de onda curta). Assim sendo, as propriedades térmicas dos materiais são relevantes na avaliação do comportamento térmico da envolvente dos edifícios. No que respeita às superfícies opacas da envolvente destes, torna-se importante avaliar as seguintes propriedades térmicas: refletância solar (ρ) e absorptância solar (α).

$$\rho = \frac{\text{Radiação Solar Refletida}}{\text{Radiação Solar Incidente}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\text{Radiação Solar Absorvida}}{\text{Radiação Solar Incidente}} \quad (2)$$

A refletância solar é então a razão entre a taxa de radiação solar refletida numa superfície e a taxa de radiação solar incidente na mesma, sendo em alguns documentos também designada de albedo. A absorptância solar é a razão entre a taxa de radiação solar absorvida numa superfície e a taxa de radiação solar incidente na mesma. A medição destas características pode ser efetuada, hoje em dia, por diferentes equipamentos e métodos. Assim sendo, a nível internacional, a ASTM (American Society for Testing and Materials) normaliza para a medição da refletância solar os seguintes métodos:

- Norma ASTM E1918-06 (2015) “Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field”;
- Norma ASTM C1549-09 (2014) “Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer”;
- Norma ASTM E903-12 “Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres”.

Existe ainda a norma ASTM E1980-11 “Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-sloped Opaque Surfaces”, que permite obter o índice de refletância solar (SRI), no

entanto no presente estado da arte não será tão aprofundado como os métodos anteriores (Akbari, Levinson e Stern, 2008).

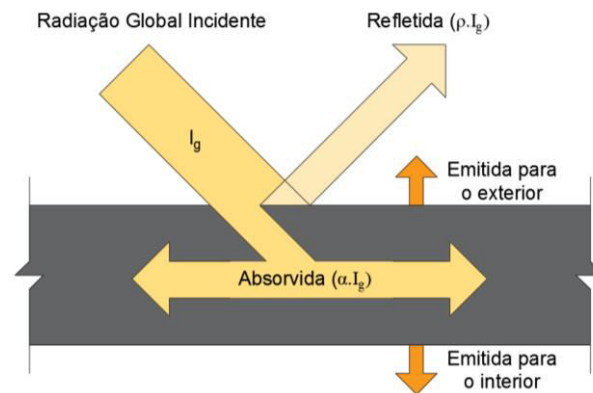


Fig. 5 – Trocas de calor por radiação num material opaco

Como se pode observar na Fig. 5 quando a radiação solar incide sobre superfícies opacas verifica-se que uma parte será refletida e a outra absorvida. Assim, apresentando a refletância e absortância valores compreendidos entre 0 e 1, basta conhecer uma destas propriedades da superfície, uma vez que uma é o complemento da outra e a soma das duas será sempre unitária ($\alpha + \rho = 1$). Importa ainda referir que tanto a absortância como a refletância são adimensionais. A título de exemplo, uma amostra com refletância solar de 1,0 significará que a sua temperatura superficial não sofrerá qualquer efeito da radiação incidente, já que nenhuma radiação será absorvida. No que respeita à energia absorvida sabe-se que, parte vai ser emitida sob a forma de radiação de onda longa para o exterior e outra parte emitida para o interior por condução ao longo do elemento construtivo. Tal como a absortância depende dos materiais também a sua emissividade vai depender.

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiação Emitida Superfície}}{\text{Radiação Emitida Corpo Negro}} \quad (3)$$

A emissividade é então a razão entre a radiação emitida por uma superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Por último, importa ainda evidenciar que se deve ter em consideração a rugosidade ou ondulação dos materiais pois pode haver inter-reflexão que provoca um aumento das suas absortâncias, como se verá mais à frente (CTCV, 2012; Dornelles, 2008; Pereira et al., 2015).

2.2.2. RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é a energia radiante proveniente do sol e que se propaga sob a forma de ondas eletromagnéticas curtas em todas as direções. No entanto, salienta-se que parte dessa radiação ao atravessar a atmosfera terrestre pode ser absorvida, espalhada ou refletida. Sendo assim, da radiação solar total apenas chega à superfície terrestre uma parcela e sob a forma de duas componentes: radiação direta (parcela que passou livremente pela atmosfera) e radiação difusa (parcela que foi dispersa pela atmosfera), sendo a sua soma designada de radiação global.

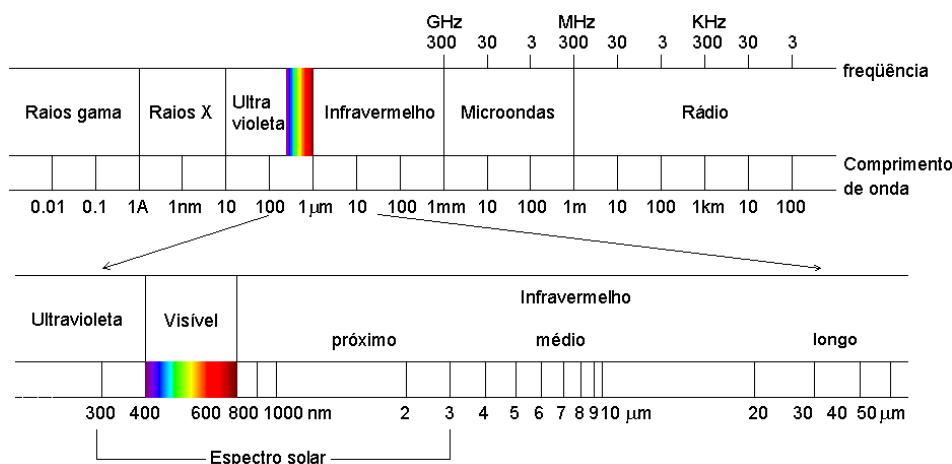


Fig. 6 – Espectro Eletromagnético e Espectro Solar (Dornelles, 2008)

Por outro lado, como se pode observar na Fig. 6, apesar da radiação solar se propagar sob a forma de ondas eletromagnéticas estas não abrangem todo o espectro eletromagnético, mas apenas a uma fração central do mesmo. De facto, considera-se que aproximadamente 99% da radiação solar está compreendida nos comprimentos de onda entre os 300 e 3000 nm, sendo designado de Espectro Solar. Torna-se assim importante medir a refletância das superfícies ao longo de todo este espectro solar visto que esta é função do comprimento de onda da radiação incidente. Como se verá posteriormente a refletância solar de uma superfície depende de vários fatores tais como: comprimento de onda da radiação, ângulo da radiação incidente, cor, rugosidade das superfícies, entre outros (ASTM, 2015).

Por outro lado, como se pode ver na Fig. 6, o espectro solar não corresponde só à luz visível, inclui ainda alguma radiação ultravioleta e infravermelha. De facto, este espectro entre os 300 e os 380 nm apresenta a região do ultravioleta (sendo que a restante parte é absorvida pela camada de ozono) responsável pela descoloração de pinturas, entre os 380 e os 780 nm tem a região visível responsável pela perceção de cores no olho humano, e entre os 780 e os 3000 nm tem a radiação do infravermelho próximo que possui um grande efeito térmico. Tal vai implicar que adotar valores de refletância solar só em função das cores das superfícies opacas não seja correto, uma vez que a radiação solar não é só constituída pela luz visível responsável pelas cores, por outro lado as cores são sensações visuais pelo que podem variar entre diferentes observadores e por último atualmente existem no mercado produtos que alteram as refletâncias, como por exemplo, pigmentos especiais que fazem aumentar a sua refletância. Ou seja, pode-se ter produtos com cores similares e refletâncias bastante diferentes. Assim sendo, apesar de se poder estabelecer relações aproximadas entre as cores e as refletâncias o mais correto é utilizar métodos para medir as refletâncias dessas superfícies (Dornelles, 2008; Ferreira e Prado, 2003; Pereira et al., 2015).

2.2.3. CORES

Como foi referido no subcapítulo 2.2.2, a região do visível do espectro eletromagnético é responsável pela perceção das cores no olho humano. De facto, a visão é nada mais nada menos que a estimulação do olho humano pela radiação da região visível do espectro eletromagnético. O olho capta a energia visível que é refletida pelos objetos e converte-a em impulsos nervosos que serão conduzidos ao cérebro e convertidos na imagem desses objetos (Dornelles, 2008).

A distinção das diferentes cores dos objetos é determinada pelos comprimentos de onda da “luz visível” que são refletidos neles. Assim sendo, a cor de um objeto depende da forma seletiva como absorve e reflete a radiação visível que incide na sua superfície. A título de exemplo, um objeto que apresente cor vermelha significa que da radiação visível que nele incide a maioria dos comprimentos de onda do vermelho (aproximadamente 630 a 760 nm) são refletidos. Por outro lado, se apresentar uma cor amarela então é refletido nos comprimentos de onda do verde e vermelho (Castro, 2002; Pedrosa, 2009).

Segundo Pereira (2000), quando as células do olho humano originam os impulsos nervosos que são conduzidos para o cérebro, vai-se causar no observador uma reação psíquica e fisiológica, designada de “resposta cromática”. Esta resposta possui três características que são designadas de atributos das cores: matiz, saturação e claridade, seguidamente apresentadas de forma sucinta:

- Matiz – frequentemente designada de cor e está relacionada com o tipo de “luz” que chega aos nossos olhos. A título de exemplo, permite fazer a distinção entre o que se denomina de verde e de azul;
- Saturação – corresponde ao grau de pureza das cores. A título de exemplo, possibilita a distinção entre o que se denomina de vermelho e vermelho-alaranjado;
- Claridade – trata-se da variação entre claro e escuro das cores, e corresponde à quantidade de luz que chega aos nossos olhos. A título de exemplo, distingue o que se designa de verde e de verde-claro.

Assim sendo, as cores dos objetos são função das características da fonte luminosa e dos próprios objetos, para os diferentes comprimentos de onda. Por outro lado, identificar as cores pelos seus nomes pode ser impreciso, sendo recomendado identificá-las por um conjunto de três números correspondentes aos três atributos das cores. Utilizando sistemas de referência, como por exemplo o Sistema de Classificação de Munsell, ou equipamentos como colorímetros, consegue-se identificar mais precisamente as cores dos objetos com base nos seus atributos (Dornelles, 2008).

2.2.4. MÉTODOS NORMALIZADOS DE MEDIÇÃO DE REFLETÂNCIA EM SUPERFÍCIES OPACAS

A refletância e absorptância solar das superfícies tem uma grande influência no conforto dos edifícios, uma vez que quando possuem baixa refletância solar (geralmente 30% ou menos) vai-se traduzir numa maior percentagem de radiação solar incidente que é absorvida por elas, tornando-se assim importante conhecer bem estas propriedades térmicas. No entanto, como geralmente é mais simples medir a parcela de radiação solar incidente que é refletida, do que a que é absorvida, é então comum utilizarem-se métodos de medição de refletância e posteriormente calcula-se matematicamente a sua absorptância ($\alpha = 1 - \rho$).

Seguidamente vai-se apresentar de forma sucinta três métodos de medição da refletância solar de superfícies definidos em normas internacionais da ASTM (American Society for Testing and Materials).

2.2.4.1. NORMA ASTM E903

A norma ASTM E903-12, “Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres”, consiste na utilização de um espectrofotómetro UV-VIS-NIR (como se pode observar na Fig. 7) equipado com esfera de integração para medir, em laboratório, a refletância ao espectro solar de uma superfície plana e homogénea de dimensões reduzidas (Akbari, Levinson e Stern, 2008; Marinoski et al., 2013).



Fig. 7 – Espectrofotômetro UV-VIS-NIR Lambda 750 da PerkinElmer (Perkin Elmer)

O espectrofotômetro corresponde a um equipamento que faz incidir sobre uma amostra um feixe de radiação com uma faixa de comprimentos de onda entre os 250 a 2500 nm, que corresponde aproximadamente aos mesmos comprimentos de onda que o espectro solar. Este equipamento vai posteriormente medir através de dois detetores (um detetor mede as faixas do ultravioleta e visível, e o outro a faixa do infravermelho próximo) a energia que é refletida nessa amostra em cada comprimento de onda, considerando uma energia constante em todo o espectro. Sendo a refletância espectral dada pela razão entre a energia refletida e a incidente. No entanto, note-se que a intensidade da radiação solar não é constante ao longo do espectro. Sendo assim, para obter a refletância solar é necessário corrigir os valores dessa refletância espectral com base na intensidade da radiação solar de cada comprimento de onda e integrar no intervalo medido. Essa correção será materializada com base nos dados do espectro solar padrão da norma ASTM G173, “Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface” (ASTM, 2012b; ASTM, 2012c; Pereira et al., 2015).

De forma um pouco sucinta, os espectrofotômetros são constituídos por componentes óticos, cujo objetivo é transportar a radiação eletromagnética até a amostra, por uma ou mais fontes de radiação de luz artificial, pelo compartimento da amostra (as suas dimensões e do próprio equipamento vão ter influência nas dimensões das amostras a testar) e ainda pelos detetores, responsáveis pela medição da intensidade da radiação refletida. Nestes equipamentos para medir a refletância utiliza-se ainda como acessório complementar uma esfera integradora (Marinoski et al., 2013; Pereira et al., 2015).

2.2.4.2. NORMA ASTM C1549

A norma ASTM C1549-09 (2014), “Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer”, consiste na medição da refletância solar de materiais planos e opacos através de um refletômetro solar portátil (imagem do equipamento na Fig. 8), também designado de SSR (solar spectrum reflectometer).



Fig. 8 – Refletômetro solar SSR-ER da D&S (D&S, 2009)

O refletómetro solar portátil é constituído por uma cabeça de medição que possui uma lâmpada difusa de tungsténio-halogénio. Esta fonte vai fazer incidir uma radiação eletromagnética sobre a superfície da amostra durante três ciclos de medição de 10 segundos cada. A radiação refletida pela superfície nos diferentes comprimentos de onda será medida por um conjunto de quatro detetores (inclinados com um ângulo de 20° em relação à direção da radiação incidente) designados de L1 (infravermelho próximo), L2 (vermelho), L3 (azul) e L4 (ultravioleta). Possui ainda um módulo eletrónico que está ligado por um cabo de conexão à cabeça de medição. Este inclui um software que interpreta os sinais de medição, permite o controlo das medições e apresenta o valor da refletância solar para a massa de ar desejável, sendo as diferentes opções selecionadas pelo seu teclado. De facto, o equipamento permite obter a refletância solar para os seguintes valores de massa de ar: 0, 1, 1.5 ou 2 (ASTM, 2014; Levinson, Akbari e Berdahl, 2010b).

Porém, este equipamento realiza as medições para um intervalo de comprimentos de onda muito mais reduzido em comparação ao do espectrómetro abrangido pela norma ASTM E903. De facto, o refletómetro solar portátil apenas efetua medições nos seguintes quatro comprimentos de onda: 380, 500, 650 e 1220 nm, explicando-se assim a necessidade dos quatro detetores. Por outro lado, antes de se realizarem medições é necessário efetuar uma calibração prévia do equipamento, que vai servir como base para a extrapolação das medições. Esta calibração corresponde à medição de um corpo negro (reflexão nula) e de amostras padrão com alta refletância, sendo estas conhecidas devido à sua medição através do método ASTM E903 (ASTM, 2014; Pereira et al., 2015).

Apesar de este método não abranger uma gama de comprimentos de onda tão vasta como a definido na norma ASTM E903 (que faz com que seja considerado o mais preciso), ele permite realizar medições em laboratório e “*In Situ*” com amostras de maiores dimensões (superiores aos 2,5 cm de diâmetro da abertura da cabeça de medição) e com valores próximos dos obtidos pelo método ASTM E903, como se verá adiante (ASTM, 2014; Marinoski et al., 2013).

2.2.4.3. NORMA ASTM E1918

A norma ASTM E1918-06 (2015), “Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field”, consiste num método para a medição da refletância solar “*In Situ*” de superfícies horizontais ou de baixa inclinação (inferiores a 9,5° ou 16,7% em relação ao plano horizontal) usando um piranómetro (imagem do equipamento na Fig. 9).

No que respeita a este método constata-se que além de ser utilizado em campo possibilita ainda a sua aplicação a grandes superfícies, ao contrário do método da norma ASTM E903. Por outro lado, tratando-se de superfícies curvas ou muito rugosas este torna-se o método mais aconselhável.



Fig. 9 – Piranómetro LP02 da Adcon Telemetry (Adcon Telemetry)

Tendo como objetivo avaliar a radiação solar, podem-se utilizar como equipamentos de medição os radiómetros. De facto, consoante o tipo de radiação medida estes radiómetros adquirem designações

diferentes. A título de exemplo, os radiômetros que medem a radiação solar global (radiação difusa mais radiação direta) são os piranômetros. O piranômetro é então um equipamento que mede o total de energia solar radiante que incide na superfície em análise por unidade de tempo e unidade de área. Podendo também nesta metodologia ser utilizado para medir o total de energia solar radiante que é refletida numa superfície por unidade de tempo e unidade de área. Sendo estas medições suficientes para obter a refletância solar, uma vez que, esta é a razão entre a radiação refletida e a radiação incidente (Harrison, 2015).

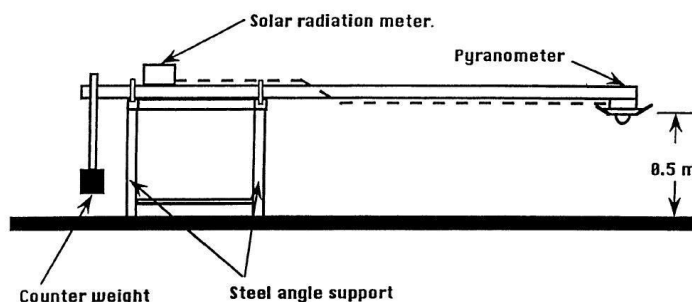


Fig. 10 – Esquema de montagem do piranômetro (ASTM, 2015)

Como se pode observar na Fig. 10, o equipamento é colocado na extremidade de um “braço” com cerca de 1 a 1,5 metros, paralelamente à superfície da amostra, que é fixado a uma estrutura de suporte que deve estar alinhada em direção ao sol. Por outro lado, este “braço” deve ser fino e longo, de forma a fazer a menor sombra possível sobre a superfície a analisar, e deve ainda possibilitar movimentos de rotação em torno do seu eixo, com o intuito de numa primeira fase o piranômetro estar voltado para cima (medindo a radiação solar incidente) e numa segunda fase voltado para baixo (medindo a radiação solar refletida). Estas medições realizadas por fases devem ser constantes durante pelo menos 10 segundos e serem efetuados num intervalo de tempo inferior a 2 minutos. Repetir este procedimento pelo menos três vezes sendo que os valores da refletância solar numa escala de 0,00 a 1,00 não devem variar mais que 0,01 entre si. Sendo a refletância solar dessa superfície a média desses três valores (ASTM, 2015).

O equipamento deve ainda ficar a uma distância de pelo menos 50 cm da superfície em análise, sendo que esta distância vai ter influência nas dimensões da amostra, uma vez que, as suas dimensões (diâmetro ou lado) devem ser no mínimo oito vezes essa distância. Assim sendo, se a amostra for circular deverá ter no mínimo 4 m de diâmetro e se for quadrangular os seus lados deverão ter no mínimo 4 m. Torna-se assim o método indicado para avaliar ruas, telhados, entre outras superfícies de grandes dimensões (ASTM, 2015).

Por último, importa ainda referir que esta metodologia só deve ser aplicada em dias claros e ensolarados, sem nuvens ou neblina durante as medições, e as superfícies das amostras devem ser homogêneas e estar secas. Caso se verifiquem estas condições o ensaio deverá ainda só ser efetuado quando o ângulo do sol com a normal da superfície seja inferior a 45°.

2.2.5. MÉTODO ALTERNATIVO E1918A

A norma ASTM E1918 só pode ser aplicada a amostras de grandes dimensões, dificultando assim o seu transporte para as zonas de ensaio caso não estejam em zonas de exposição à radiação solar. Sendo assim, vai-se apresentar o método alternativo E1918A (não é uma norma internacional como as

anteriores) proposto por Akbari, Levinson e Stern (2008), tratando-se de uma variação da norma internacional ASTM E1918. Permite medir a refletância de superfícies circulares ou quadradas, com cerca de 1 m de diâmetro ou 1 m de lado (valores mínimos recomendados), respetivamente. Tal como o método ASTM E1918, este também permite a medição de superfícies planas e curvas, possibilita a eliminação dos erros causados pela envolvente, a minimização dos erros devido a sombras e recorre na mesma à utilização de um piranómetro. Porém, acrescenta-se ainda às amostras para medição um par de máscaras brancas e pretas opacas de refletâncias conhecidas (pelo método ASTM E903) e com dimensões iguais às das amostras (Akbari, Levinson e Stern, 2008; Levinson, Akbari e Berdahl, 2010b; Pacheco-Torgal et al., 2015).

Seguidamente vai se apresentar de uma forma mais pormenorizada a teoria deste método. A respetiva metodologia de ensaio será apresentada no subcapítulo 3.1.1. Assim sendo, considerando a existência de uma amostra de área A_t , a sua refletância solar poderá ser obtida neste método pela seguinte expressão:

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b) \quad (4)$$

Onde:

R_t = Refletância solar da amostra;

R_b = Refletância solar da máscara preta opaca;

R_w = Refletância solar da máscara branca opaca;

I_1 = Irradiância solar da máscara branca opaca [W/m^2];

I_2 = Irradiância solar da máscara preta opaca [W/m^2];

I_3 = Irradiância solar da amostra [W/m^2];

Nota: a refletância solar é adimensional.

A potência é a razão entre a energia absorvida ou cedida por um sistema e o tempo que durou essa troca de energia, sendo expressa em watt (W) no sistema internacional de unidades (SI). A irradiância solar é a potência da radiação solar por unidade de área, incidente numa superfície em todas as direções. No sistema internacional de unidades (SI) a irradiância é expressa em watt por metro quadrado (W/m^2) e é obtida pela seguinte expressão:

$$I = \frac{P_{\text{incidente}}}{A_{\text{superfície}}} \quad (5)$$

Como se pode observar pela expressão (4), na realização deste ensaio vai medir-se com o piranómetro as irradiâncias I_1 , I_2 e I_3 . Estas podem-se relacionar com o I_H (irradiância solar total incidente numa superfície horizontal), que também será medido, e com as refletâncias solares R_t , R_w , R_b e R_s (refletância solar da envolvente da amostra) pelas seguintes expressões:

$$I_1 = I_H \times [F \times R_w + (1 - F) \times R_s] \quad (6)$$

$$I_2 = I_H \times [F \times R_b + (1 - F) \times R_s] \quad (7)$$

$$I_3 = I_H \times [F \times R_t + (1 - F) \times R_s] \quad (8)$$

Sendo que, F é o fator de forma ou fator de radiação do piranómetro para o alvo. Note-se que, quanto menores as dimensões das amostras maior será o erro de medição, sendo por isso recomendado utilizar amostras com pelo menos 1 m^2 para aplicação deste método (Akbari, Levinson e Stern, 2008; Levinson, Akbari e Berdahl, 2010b).

Note-se que, tal como para o método ASTM E1918 esta metodologia também só deve ser aplicada em dias claros e ensolarados, sem nuvens ou neblina durante as medições. Caso se verifiquem estas condições o ensaio deverá ainda só ser efetuado quando o ângulo do sol com a normal da superfície seja inferior a 45° (Akbari, Levinson e Stern, 2008; Levinson, Akbari e Berdahl, 2010a; Levinson, Akbari e Berdahl, 2010b).

2.2.6. PIRANÓMETROS

Tendo como intuito relacionar os aumentos de temperatura equivalentes na superfície das amostras com os valores de refletância e absorptância (medidos e calculados, respetivamente) vai-se optar pela utilização do método alternativo E1918A (medições “*In Situ*”). Optou-se pelo método alternativo para a realização das medições porque o método ASTM E1918 exige amostras com grandes dimensões, o que dificultava a sua movimentação e aquisição de espaço para as colocar, o método ASTM C1549 implicava a aquisição de equipamentos mais dispendiosos e o método ASTM E903 só pode ser usado para medições em laboratório.

Como já foi previamente referido, um piranómetro é então um equipamento que quando voltado para cima mede o total de energia solar radiante que incide numa superfície horizontal por unidade de tempo e unidade de área, e quando voltado para a amostra mede o total de energia solar radiante que é refletida na sua superfície por unidade de tempo e unidade de área. É recomendado que a faixa de medição espectral dos piranómetros esteja compreendida entre os $0,28$ e os $2,80 \text{ }\mu\text{m}$, sendo que normalmente apresenta valores de saída de irradiância entre 0 e 1400 W/m^2 com um tempo de resposta de um segundo. Este tipo de piranómetros usualmente possui uma dupla cúpula com o intuito de minimizar efeitos internos de convecção, resultantes de inclinar-se em ângulos diferentes o piranómetro. Por outro lado, importa ainda referir que em geral (conforme o tipo de equipamento) os dados provenientes do piranómetro terão de ser convertidos da sua saída analógica para digital por um medidor de leitura, cuja precisão é superior a $\pm 0,5\%$ e a resolução de 1 W/m^2 (ASTM, 2015).

Os piranómetros estão normalizados de acordo com a norma ISO 9060 que os discrimina em três classes: sendo os melhores designados de “secondary standard”, seguidos pelos “first class” e por último os “second class”. Por outro lado, a norma salienta ainda a diferença entre dois tipos de piranómetros existentes: o piranómetro de termopilha (vulgarmente designado de piranómetro) e o piranómetro de silício (também designado de “Silicon-Pyranometer”) que apesar de possuírem uma conceção semelhante diferenciam-se nos sensores de medição. De facto, um piranómetro possui um sensor de termopilha (termopares ligados em série) que converte energia térmica em energia elétrica, ou seja,

mede a radiação solar incidente pelo calor que gera, enquanto que o piranómetro de silício possui um sensor fotoelétrico que mede a radiação solar incidente pela eletricidade que gera. Como se pode observar na Fig. 11 o piranómetro de silício não é tão uniforme e abrangente ao longo da gama espectral. Além disso um piranómetro de silício, ao contrário de um piranómetro, não está abrangido pela norma ISO 9060, os seus métodos de calibração também não estão normalizados e não podem ser diretamente comparados com os piranómetros de termopilha para melhor precisão. Sendo assim, o piranómetro de termopilha é o mais aconselhado para as medições deste método alternativo. Importa ainda referir que a WMO (World Meteorological Organization) também classifica os piranómetros em três classes: “high quality”, “good quality” e “moderate quality”, sendo que a principal diferença desta classificação em relação à ISO, é a exigência de cerca do dobro da resposta espectral (Hukseflux; ISO; Vignola, Michalsky e Stoffel, 2012).

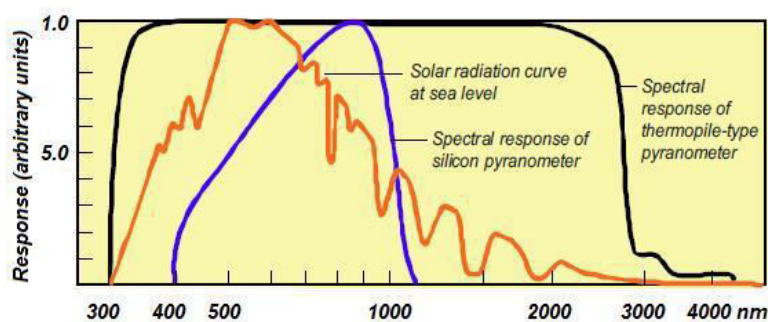


Fig. 11 – Comparação do espectro da radiação solar com as respostas espectrais do piranómetro de termopilha e do piranómetro de silício (Hukseflux)

Seguidamente vai-se apresentar de forma sucinta a constituição de um piranómetro. Assim sendo, como estes equipamentos geralmente são colocados no exterior, em posições expostas aos agentes atmosféricos, o corpo exterior do equipamento tem de ser robusto e constituído por materiais resistentes à ferrugem, por exemplo o alumínio. Consoante o equipamento, no seu exterior existe ainda uma ou duas cúpulas de vidro ou acrílico responsável por filtrar a radiação solar, pela eliminação de correntes de ar junto ao sensor, minimizar efeitos internos de convecção, de acumulação de sujidade ou gotas de água que poderão influenciar os valores medidos pelo sensor. De facto, esta cúpula apenas permite a transmissão de radiação cujo os comprimentos de onda estão compreendidos entre os 300 e os 2800 nm, preservando um campo de visão de 180°. No interior do equipamento tem-se o sensor termopilha cuja função é a conversão do gradiente de temperatura (entre o disco preto e a junta fria ligada ao corpo do piranómetro) em sinal elétrico. Este sensor está coberto por um disco preto cujo espectro de absorção abrange todo o espectro solar. Possui ainda um nível de bolha, parafusos niveladores, entrada/saída de conexão e um reservatório de sílica-gel, que absorve a humidade no interior. Caso seja necessário contabilizar a radiação solar difusa pode-se acoplar ao equipamento um anel de sombreamento ou utilizar um piranómetro com máscara de sombra no seu interior, tal como se pode observar na Fig. 12. Por último, pode-se ainda utilizar ventiladores em conjunto com os piranómetros que vão evitar a existência de humidade, neve e poeiras na sua cúpula. Os ventiladores consistem num cilindro com uma ventoinha que são montados por baixo dos piranómetros (Kipp&Zonen, 2015; Vignola, Michalsky e Stoffel, 2012).

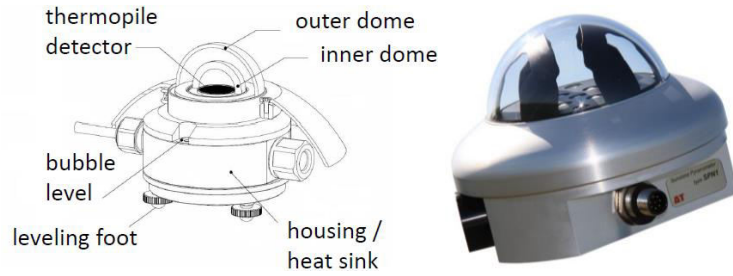


Fig. 12 – Esquema simplificado de um piranômetro (Hukseflux) e Piranômetro SPN1 com máscara de sombra (Delta-T Devices)

O sensor termopilha dos piranômetros funciona de uma forma linear, no qual quanto maior o gradiente de temperatura medida mais corrente elétrica se gera, isto é, se a radiação solar incidente duplicar então vai-se gerar o dobro de corrente elétrica. Por outro lado, este sensor também responde de forma direcional, ou seja, mede a irradiância máxima quando o sol está diretamente sobre ele (ângulo zenital de 0°) e não detecta nada quando o sol está no horizonte (ângulo zenital de 90°). Assim sendo, o sinal elétrico do piranômetro varia com o cosseno do ângulo $[\cos(\theta)]$ entre o sol e a normal do equipamento, sendo este um dos parâmetros que influencia a incerteza dos piranômetros. Quanto maior o ângulo zenital maior o erro associado às medições, resultando daqui a necessidade de realizar estas enquanto o ângulo zenital é inferior a 45°. Adotando I_0 como a irradiância medida pelo piranômetro quando o sol está diretamente sobre ele então a irradiância nas restantes situações é dada pela expressão seguinte (Brooks, 2008; Hukseflux).

$$I_H = I_0 \times \cos(\theta) \quad (9)$$

Torna-se também muito importante garantir que o piranômetro esteja devidamente nivelado e a sua plataforma bem segura. Pois segundo o livro “Solar and Infrared Radiation Measurements” de Vignola, Michalsky e Stoffel (2012), um desajuste de 0,5° no nivelamento do equipamento para uma incidência solar com ângulo zenital de 30° corresponde a um erro de 0,1% e para uma incidência solar com ângulo zenital de 80° o erro já será de 1,2%.

Por outro lado, como não existem oficialmente normas reconhecidas para determinar qual a precisão dos piranômetros (fabricantes apenas fornecem estimativas da sua precisão) apresenta-se seguidamente um método prático para estimar a precisão das medições dos piranômetros (Hukseflux).

$$P = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2} \quad (10)$$

Onde:

P = Precisão das medições do piranômetro [%];

a = Incerteza de calibração [%];

b = Resposta direcional [%];

c = Resposta de Temperatura [%];

d = Mudança de sensibilidade (também designado de non-stability, depende do fabricante e não da classe do piranómetro) [%];

Por último, importa ainda referir que nas medições “*In Situ*” pode-se utilizar como substituto do piranómetro um albedómetro (imagem do equipamento na Fig. 13), que basicamente consiste num instrumento de medida constituído por dois piranómetros. De facto, este equipamento facilita bastante as medições pois já não há a necessidade de andar a rodar o piranómetro para cima e para baixo, o que permite também reduzir os efeitos de convecção que afetam as medições (Pacheco-Torgal et al., 2015).



Fig. 13 – Albedómetro SRA01 da Hukseflux Thermal Sensors (Hukseflux)

2.3. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL

2.3.1. GENERALIDADES

No que respeita às variações de temperatura a que as superfícies da envolvente exterior dos edifícios são submetidas deve-se considerar dois aspetos essenciais, seguidamente apresentados (Guimarães et al., 2002).

- As superfícies exteriores em que se verifica um grande aumento de temperatura vão provocar um maior desconforto no interior das habitações, uma vez que, o calor irá propagar-se pelo elemento construtivo por condução.
- O segundo aspeto está ligado com as tensões provenientes das deformações provocadas pelas variações de temperatura. Essas variações provocam alterações dimensionais nos revestimentos. Sendo que, expansões levam a tensões de compressão e as retrações a tensões de tração.

Com base no primeiro aspeto, sabe-se que em **regime permanente** a densidade do fluxo de calor transmitida através de um elemento construtivo, por ação da radiação solar incidente e da diferença de temperatura do ar, é dada pela expressão seguinte:

$$q = U \times \left(\theta_e + \frac{\alpha \times I_g}{h_e} - \theta_i \right) \quad (11)$$

Onde:

q = densidade do fluxo de calor [W/m^2];

U = coeficiente de transmissão térmica do elemento [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$];

θ_e = temperatura do ar exterior [$^\circ\text{C}$];

θ_i = temperatura do ar interior [$^\circ\text{C}$];

α = absorptância solar (ou coeficiente de absorção);

I_g = irradiância solar global incidente [W/m^2];

h_e = condutância térmica superficial exterior [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$].

Com base na expressão anterior pode-se obter a temperatura superficial da envolvente exterior dos edifícios pela seguinte expressão:

$$\theta_{se} = \left(1 - \frac{U}{h_e}\right) \times \left(\theta_e + \frac{\alpha \times I_g}{h_e}\right) + \frac{U}{h_e} \times \theta_i \quad (12)$$

Akbari, Levinson e Berdahl (1996) também propuseram uma expressão que permite determinar a temperatura de uma superfície exposta ao sol (quando condução no material é nula) e que ilustra ainda a importância da absorptância:

$$\alpha \times I_g = \varepsilon \times \sigma \times (T_s^4 - T_c^4) + h_c \times (T_s - T_a) \quad (13)$$

Onde:

α = absorptância solar (ou coeficiente de absorção);

I_g = irradiância solar global incidente [W/m^2];

ε = emissividade da superfície;

σ = constante de Stefan-Boltzmann, $5,671 \times 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$];

T_s = temperatura absoluta da superfície [K];

T_c = temperatura aparente do céu [K];

T_a = temperatura absoluta do ar [K];

h_c = coeficiente de convecção [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].

É recomendado pela norma ASTM E1980-98 (“Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces”) um I_g de 1000 w/m², um T_a de 310 K (37 °C), um T_c de 300 K (27 °C) e um h_c de 12 w/(m².K). Sendo que sob tais condições se pode estimar as temperaturas superficiais pela expressão seguinte, caso contrário essas temperaturas são obtidas por iteração da expressão (13).

$$T_s = 310,04 + 82,49 \times \alpha - 2,82 \times \varepsilon - 54,33 \times \alpha \times \varepsilon + 21,72 \times \alpha \times \varepsilon^2 \quad (14)$$

Pode-se observar pelas expressões (11), (12), (13) e (14) que a absorptância solar afeta diretamente as temperaturas superficiais e o fluxo de calor que atravessa os elementos construtivos. Guimarães et al. (2002) realizou alguns ensaios que permitiu confirmar que os revestimentos de fachadas com absorções mais altas apresentam maior variação superficial de temperaturas.

Note-se que, no caso de edifícios com isolamento térmico pelo exterior, como Sistema com Reboco Térmico e ETICS, verifica-se que durante o dia a radiação solar ao incidir nas suas superfícies aumenta bastante as temperaturas das camadas exteriores ao isolamento. Tal deve-se ao facto de o fluxo de calor ao longo do elemento construtivo ser menor. Porém, durante a noite essas camadas mais exteriores arrefecem rapidamente e como o fluxo de calor também é menor, atingem-se temperaturas superficiais exteriores mais baixas. Assim sendo, as fachadas com isolamento térmico pelo exterior estão sujeitas a maiores variações de temperaturas o que levará a maiores variações dimensionais dos seus revestimentos, ou seja, maiores tensões sobre eles. Com base na expressão (12) conclui-se que quanto menor o U, ou seja, quanto mais isolada uma parede maior a temperatura superficial exterior.

No entanto, nas expressões anteriores está-se a considerar um regime permanente, ou seja, considerando que a temperatura das superfícies internas e externas são aproximadamente constantes ao longo do tempo, o que se traduz num fluxo de calor constante. Porém, na realidade essas temperaturas não são constantes no tempo fazendo com que o fluxo de calor também não seja, sendo necessário considerar então um **regime variável**.

Assim sendo, considerando uma parede de espessura 2L e temperatura T_i , colocada num meio com temperatura T_∞ e mantida nele durante $t > 0$, sabe-se que apresenta um perfil de variação de temperatura ao longo do tempo como o da Fig. 14:

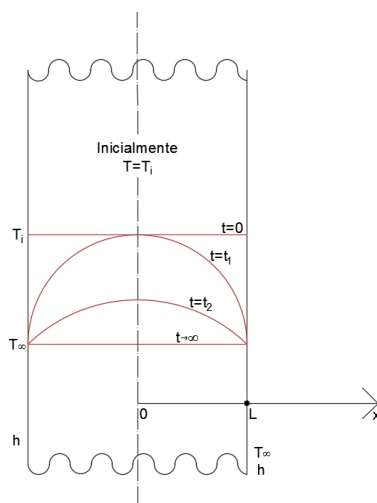


Fig. 14 – Perfil da variação de temperatura no tempo de uma parede plana

Segundo Çengel (2007) e Bergman et al. (2011) para determinar essa distribuição de temperaturas unidimensionais de uma parede, em regime variável, resulta numa equação diferencial parcial, cuja solução implica habitualmente séries infinitas de complexa resolução e com muitas variáveis (por isso normalmente utilizam-se gráficos). Porém, quando o número de Fourier [$\tau = (\alpha t) / L^2$] não é pequeno, é possível considerar como aproximação apenas o primeiro termo dessas séries. De facto, com o aumento do tempo os termos nas soluções rapidamente convergem e para $t > 0,2$ considerar só o primeiro termo corresponde a um erro menor que 2%. Assim sendo, para a parede de espessura $2L$ uma aproximação de seu perfil de temperatura pode ser dada pela seguinte expressão:

$$\theta(x, \tau) \equiv \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 \times e^{-\lambda_1^2 \times \tau} \times \cos\left(\frac{\lambda_1 \times x}{L}\right) \quad \tau > 0,2 \quad (15)$$

Os valores A_1 e λ_1 são tabelados e em função do número de Biot ($B_i = hL/k$). Por outro lado, a temperatura no centro da parede pode ser obtida pela expressão:

$$\theta_{0, Parede}(\tau) \equiv \frac{T_0(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 \times e^{-\lambda_1^2 \times \tau} \quad (16)$$

A temperatura superficial ($x = L$) poderá ser obtida pela expressão:

$$\theta_{S, Parede}(\tau) = \frac{T_0(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = A_1 \times e^{-\lambda_1^2 \times \tau} \times \cos(\lambda_1) \quad (17)$$

Por último, importa ainda referir a existência de gráficos que permite obter a temperatura no centro de uma parede plana e em outros pontos num determinado tempo, e a quantidade total de calor que foi transferido até um dado tempo (sempre para $\tau > 0,2$). Estes gráficos foram desenvolvidos em 1947 por M. P. Heisler e completados em 1961 por H. Gröber, como gráficos de transferência de calor em regime variável (Çengel, 2007).

2.3.2. Equipamentos para Medição de Temperaturas

O primeiro conceito de temperatura estabelecido pelo ser humano é através da sensação tátil e que se traduz por quente ou frio, morno ou gelado, etc. Porém, a nossa percepção das temperaturas pode ser enganadora, como tal, não pode ser utilizado para fins de investigação científica. A título de exemplo, o puxador metálico de uma porta aparenta estar mais frio do que a própria porta de madeira, no entanto estão ambos à mesma temperatura apresentando apenas propriedades térmicas diferentes. Torna-se assim necessário utilizar um equipamento normalizado, como por exemplo o termómetro, para a medir as respetivas temperaturas (Anacleto, 2007).

Existem diferentes tipos de termómetros, cuja opção por um deles estará dependente da aplicação pretendida. Estes equipamentos podem ser de dois tipos: termómetros de contacto (mecânico ou elétrico), sendo necessário contacto físico com o sistema para medição da temperatura, ou pirómetros,

sendo a temperatura medida pela radiação térmica emitida pelos sistemas. No que respeita aos termómetros de contacto, são seguidamente apresentados alguns exemplos (Anacleto, 2007; Fialho, 2002).

- Termómetros de dilatação de líquido em recipiente de vidro ou metálico, sendo os líquidos mais utilizados o mercúrio (atualmente em desuso devido aos problemas ambientais) e o álcool etílico. Fundamenta-se na lei de expansão volumétrica do líquido com a temperatura num recipiente fechado;
- Termómetro de máxima e mínima, fornecendo as temperaturas máximas e mínimas ao longo do período de análise;
- Termómetro de dilatação de sólidos, utilizados na indústria e aplicações domésticas (termóstatos de frigoríficos, aquecedores, ...) e baseia-se no princípio da dilatação linear dos metais com a temperatura. Também é conhecido como termómetro de lâmina bimetálica e mede temperaturas entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $300\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Termopares, tratam-se de sensores utilizados para medir elevadas gamas de temperaturas, desde $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ até valores superiores a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. É constituído por dois fios ligados entre si de materiais condutores ou semicondutores diferentes, e que geram corrente elétrica consoante a diferença de temperatura entre a junção de referência e de medição. A corrente gerada vai ser medida por um voltímetro ligado no circuito termoelétrico;
- Termómetro de resistência, são sensores medem temperatura de $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ e que variam a resistência elétrica com a temperatura;
- Termómetros de pressão de gás, medem as temperaturas pela leitura da pressão de um gás a volume constante e é recomendado para medir temperaturas baixas. A gama de temperatura para um gás inerte sob pressão moderada é de $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

No que respeita aos pirómetros, são seguidamente apresentados alguns exemplos (Anacleto, 2007; Fialho, 2002; Güths e Paulo, 1998):

- Pirómetros óticos, medem temperaturas entre os $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ e os $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este equipamento apresenta como desvantagens: só mede com precisão a temperatura de corpos com emissividade de 1 (corpos negros) e temperatura de corpos que radiam essencialmente no espectro visível;
- Pirómetros de radiação, tal como o da Fig. 15, medem temperaturas inferiores a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estes equipamentos podem ter como sensor uma termopilha (termopares ligados em série), sensor fotoelétrico ou resistência de platina.



Fig. 15 – Pirómetro ST640 de radiação infravermelha (CALEX, 2008)

Por último, pode-se ainda avaliar a temperatura das superfícies exteriores dos edifícios recorrendo a ensaios termográficos. Estes devem seguir a norma europeia EN 13187:1999 – “Thermal performance

of buildings. Qualitative detection of thermal irregularities in buildings envelopes. Infrared method.”. Para realização destes ensaios utiliza-se uma câmara termográfica que se baseia no princípio que a radiação emitida pelo material é função da sua temperatura superficial, e após a sua medição obtém-se uma imagem térmica do objeto. A câmara termográfica mede então a radiação emitida pelos materiais por meio de interpolação da Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (18)$$

Onde, E corresponde à energia da radiação (w/m^2), T à temperatura (K), ε à emissividade e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ w/(m}^2\text{K}^4)$). Importa ainda referir que todos os objetos que rodeiam a superfície a medir também imitem radiação afetando os valores de temperatura medidos. Sendo assim, uma alternativa para contornar este problema é seguir a metodologia descrita na norma ASTM E1862-97 “Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature using Infrared Imaging Radiometers” (Marques, 2014; Ocaña, Guerrero e Requena, 2004).

2.3.3. Termopares

Os termopares, como anteriormente referido, são sensores utilizados para medição de temperaturas. O seu funcionamento baseia-se no princípio da termoelectricidade, ou seja, é constituído por um par de condutores ou semicondutores diferentes ligados entre si em duas junções (tal como no esquema da Fig. 16), que quando se encontram a diferentes temperaturas criam uma força eletromotriz. Esta força é conhecida como o Efeito Seebeck e é função do gradiente de temperatura entre as junções.

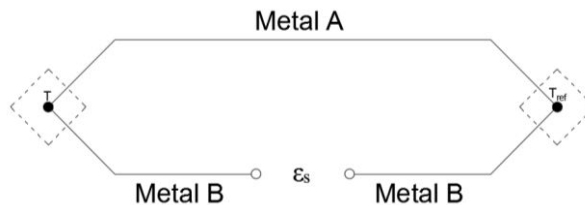


Fig. 16 – Esquema de um Termopar

Assim sendo, um termopar é um sensor ativo, uma vez que, as duas junções a diferentes temperaturas produzem a própria força eletromotriz. Essas junções podem ser materializadas por aperto dos materiais ou soldaduras, e uma delas está ligada à superfície que se pretende medir (junta quente ou de medição) e a outra extremidade fica ligada ao instrumento de medição da f.e.m., que corresponde à junção de referência (ou junta fria). O equipamento de medição utilizado é um voltímetro e para medições mais precisas este deve possuir uma elevada resistência interna, como intuito de que a corrente no circuito seja pequena tornando os efeitos de Peltier e Thomson desprezáveis, já que na medição de temperaturas com termopares estes efeitos introduzem erros na medição. Por outro lado, os termopares apresentam um conjunto de vantagens que os tornam interessantes para medição de temperaturas: grande intervalo de medição de temperaturas ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que utilizando termopares de platina se pode medir temperaturas mais elevadas), rápido tempo de resposta, a sua construção é compacta e possui grande robustez, resistência à vibração e estabilidade duradoura (Anacleto, 2007; Fialho, 2002).

Os circuitos termoelétricos no qual se baseia o funcionamento dos termopares segue um conjunto de leis seguidamente enunciadas (Fialho, 2002):

- Lei do Circuito Homogêneo – A f.e.m. gerada depende unicamente das temperaturas existentes nas duas junções e da composição química dos condutores ou semicondutores. A título de exemplo, pode-se verificar um grande gradiente de temperatura num ponto ao longo dos fios do termopar, que este não alterará a f.e.m gerada pelo gradiente de temperatura das juntas;
- Lei dos Metais Intermediários – Introduzindo um terceiro metal diferente num dos dois condutores (ou semicondutores) do termopar quando a temperatura nas junções seja a mesma, não introduzirá alterações na f.e.m. gerada;
- Lei das Temperatura sucessivas – A f.e.m gerada por um circuito com a as temperaturas T_1 e T_3 será a soma das f.e.m. geradas pelo circuito com as temperaturas T_1 e T_2 com o circuito de temperaturas T_2 e T_3 ;

$$\mathcal{E}_{13} = \mathcal{E}_{12} + \mathcal{E}_{23} \quad (19)$$

Note-se que, nesta expressão e na seguinte ε corresponde à tensão produzida e não à emissividade dos materiais.

- Lei dos metais sucessivos – A soma das f.e.m geradas por um termopar constituído pelos materiais A e C com outro de materiais C e B é igual à f.e.m de um termopar de materiais A e B;

$$\mathcal{E}_{AB} = \mathcal{E}_{AC} + \mathcal{E}_{CB} \quad (20)$$

- Os termopares devem sempre ser constituídos com pelo menos dois metais diferentes e duas junções.

Por último, importa referir que apesar de se poder construir termopares com dois metais à escolha, desde que diferentes, é aconselhável utilizar-se combinações de metais já normalizadas, cujas tensões de saída são previsíveis. A escolha do tipo de termopar vai depender essencialmente do ambiente e do intervalo de temperaturas. Seguidamente apresenta-se no Quadro 1 alguns desses tipos de termopares (Fialho, 2002; Güths e Paulo, 1998).

Quadro 1 – Tipos de termopares, respetivos intervalos de temperatura e vantagens

Tipo	Elemento +	Elemento -	Intervalo de temperaturas	Vantagens
T	Cobre	Liga Constantan	-184 a 370 °C	- Resiste a atmosferas corrosivas - Indicado para medição de temperaturas abaixo dos 0 °C devido à sua estabilidade
K	Liga Chromel	Liga Alumel	0 a 1260 °C	- Recomendado para ambientes oxidantes - Para temperaturas mais elevadas comporta-se melhor que os tipos S, R e J
J	Ferro	Liga Constantan	0 a 760 °C	- Custo reduzido - Recomendado para medições em ambientes neutros ou redutores dentro da sua gama de temperaturas

Tipo	Elemento +	Elemento -	Intervalo de temperaturas	Vantagens
E	Liga Chromel	Liga Constantan	0 a 870 °C	- Elevada potência termoeletrônica - Os seus elementos são resistentes à corrosão
S	Platina e 10% Ródio	Platina	0 a 1480 °C	- Recomendado para atmosferas oxidantes - Boa precisão para temperaturas mais altas
R	Platina e 13% Ródio	Platina	0 a 1480 °C	- Iguais às do Tipo S
B	Platina e 30% Ródio	Platina e 6% Ródio	870 a 1705 °C	- Melhor estabilidade que o Tipo R ou S e mais indicado que estes para altas temperaturas - Maior resistência mecânica

Fonte: (Güths e Paulo, 1998)

2.4. TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO SOBRE MEDIÇÕES “IN SITU”

2.4.1. MEDIÇÃO “IN SITU” DA RADIAÇÃO, REFLETÂNCIA E ABSORTÂNCIA SOLAR

Após alguma pesquisa encontra-se na literatura técnica especializados valores de refletância solar de superfícies e respectiva relação com as cores. Possibilitando assim obter-se de forma aproximada, para tintas convencionais, a sua refletância solar consultando tabelas, com valores característicos medidos previamente para as suas cores. Tem-se a título de exemplo o Quadro 2 presente no documento “Product Rating Program CRRC-1” do CRRC (2015):

Quadro 2 – Cores e respectivos valores da refletância solar

Cor	Refletância Solar (ρ)	Cor	Refletância Solar (ρ)
Vermelho	0,25	Castanho, médio a claro	0,32
Terracota	0,35	Verde Escuro	0,25
Vermelho Vivo	0,35	Verde, médio a claro	0,32
Bege	0,55	Branco	0,65
Bronze	0,45	Branco Vivo	0,70
Azul Escuro	0,25	Preto	0,25
Azul, médio a claro	0,32	Cinza Escuro	0,25
Castanho Escuro	0,25	Cinza, médio a claro	0,35

Fonte: CRRC (2015)

Porém, por vezes esses valores tabelados são bastante genéricos e imprecisos. Castro (2002) e Dornelles (2008) compilaram alguns valores de absorptância solar publicadas por diferentes autores. Como se poderá observar no Quadro 3, no geral são considerados intervalos de valores com grandes amplitudes.

Quadro 3 – Compilação de valores de absorptância publicados por diferentes autores

Cores	Absorptância Solar (α)						
	Rivero (1986)	Szokolay (1987)	Mascaró (1991)	Frota e Schifter (1995)	Lamberts, Dutra e Pereira (1997)	ASHRAE (2001)	ABNT (2005)
Escuras	0,85-0,98	---	0,70-0,85	---	0,70-0,90	0,65-0,80	---
Médias	0,65-0,80	---	0,50-0,70	---	0,50-0,70	---	---
Claras	0,25-0,50	---	0,30-0,50	---	0,20-0,50	---	---
Preta	---	0,96	0,92-0,96	0,90-1,00	---	0,85-0,98	0,97
Vermelha	---	---	0,65-0,90	0,30-0,70	---	0,65-0,80	0,74
Amarela	---	---	0,30-0,70	0,30-0,50	---	0,50-0,70	0,30
Branca	---	0,30	0,05-0,15	0,20-0,30	---	0,23-0,49	0,20

Fonte: Dornelles (2008)

No entanto, como anteriormente já foi referido, por um lado a radiação solar não é só constituída pela luz visível responsável pelas cores e por outro as cores são sensações visuais pelo que podem variar entre diferentes observadores. Além disso, existem ainda um conjunto de fatores que pode influenciar bastante os valores da refletância e absorptância solar, tais como pigmentos para aumentar a sua refletância, aplicação de verniz sobre as tintas, o tipo e acabamento das tintas, a rugosidade ou ondulação das superfícies, o envelhecimento dos materiais, entre outros.

Apresenta-se seguidamente no Quadro 4 os valores da refletância solar de seis amostras de telhas pintadas de cores diferentes e posteriormente com aplicação de verniz sobre elas, utilizando o método ASTM C1549.

Quadro 4 – Valores da refletância solar de amostras pintadas com e sem verniz

Cor	Refletância Solar (ρ)	
	Sem Verniz	Com Verniz
Grafite	0,16	0,14
Vermelho	0,26	0,20
Bege	0,31	0,20
Cinzentos	0,36	0,20
Marfim palha	0,47	0,41
Marfim claro	0,49	0,45

Fonte: Sato, Loh e Silva (2012)

A refletância das superfícies também se vai alterando com a idade ou tempo de utilização dos materiais. De facto, a exposição das superfícies aos agentes atmosféricos tende a aumentar a refletância dos materiais mais escuros e diminuir a refletância dos mais claros (Ferreira e Prado, 2003).

Com base no documento “Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil” de Ferreira e Prado (2003), apresenta-se no Quadro 5 os valores da refletância de alguns materiais novos medidos pelo método ASTM E903 e posteriormente os seus valores quando envelhecidos:

Quadro 5– Valores da refletância solar de amostras novas e envelhecidas

Material	Refletância Solar (ρ)	
	Novo	Envelhecido
Cerâmica vermelha	0,68	0,53
Fibrocimento	0,39	0,34
Alumínio sem pintura	0,73	0,57
Cimento cor escura	0,13	0,15
Cimento cor clara	0,33	0,29
Aço galvanizado	0,73	0,57

Fonte: Ferreira e Prado (2003)

Também Bretz e Akbari (1997) analisaram os efeitos na refletância solar do envelhecimento de telhados de alta refletância. Esses efeitos ao longo do tempo são dependentes do tipo de revestimento, da inclinação dos telhados, da sua textura e proximidade de fontes de poluição. Porém, verificou-se em todos eles uma redução média de 0,15 na refletância solar no primeiro ano, e no restante tempo essa redução era mais gradual. Os autores propõem ainda como medida preventiva para contrariar esta redução uma lavagem periódica das superfícies.

Seker e Tavit (1996) avaliaram a influência da rugosidade na absorvância de 10 amostras. As amostras foram todas pintadas com a mesma tinta apresentando apenas rugosidades diferentes. Nestas condições, verificou-se que por cada aumento de 1 mm de rugosidade a absorvância era aumentada em 23%. Sendo estes valores bastante significativos para as superfícies dos edifícios. Note-se que, com base no mesmo princípio de que a inter-reflexão aumenta a quantidade de energia radiante absorvida, também as ondulações das superfícies a vão originar.

Na dissertação de mestrado de Castro (2002) foi realizado a medição da refletância solar, utilizando o espectrofotómetro segundo o método ASTM E903, de um conjunto de amostras de tintas aplicadas em pastilhas cerâmicas e de amostras de um catálogo de fabricante de tintas. Constatou-se que a cor amarela “baunilha” apresentava a maior refletância solar (0,66), sendo superior à cor branco gelo (0,57) e marfim (0,64). Comprovando-se assim a limitação da visão humana para prever esses valores de refletância solar só pela cor. A autora desta dissertação comprovou ainda que por uma cor refletir muito na zona do visível não significa que também apresentará um valor de refletância total alto. A título de exemplo, a cor Branco Gelo tem boa refletância no visível (0,69) mas valor mais baixo no infravermelho (0,59), o que afetará a sua refletância solar total. Dornelles (2008) na sua tese de doutoramento também comprovou que as cores não são indicadores de confiança das propriedades físicas das superfícies. De facto, após medir as refletâncias solares de um conjunto de amostras, com base no método ASTM E903,

concluiu que amostras pintadas com tintas da mesma cor, tipo e fabricante, mas acabamentos diferentes (semi-brilho e fosco) apresentam diferenças consideráveis. O mesmo se verificou para tintas da mesma cor, acabamento e fabricante, mas de tipos diferentes (PVA e acrílica), e ainda para tintas da mesma cor, tipo e acabamento, mas fabricantes distintos, pois há influência dos diferentes processos de fabrico. Por outro lado, mostrou que existem cores com refletâncias praticamente iguais, mas aparências bastante diferentes (rosa médio e cinza claro), e cores cuja absorvância na região do visível eram semelhantes, mas com absorvâncias totais diferentes (Cinza BR e Flamingo cuja a diferença era de 18,2%). Ou seja, comprova-se mais uma vez que avaliar a refletância só pela região do visível pode introduzir erros significativos.

Sendo assim, o mais indicado para avaliar a refletância solar é a utilização dos métodos anteriormente apresentados, o método alternativo e os três métodos regulamentados em normas internacionais pela ASTM. Vai-se seguidamente apresentar algumas comparações entre medições efetuadas pelos diferentes métodos.

Assim sendo, no XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído realizado em Brasília, entre 25 e 27 de setembro de 2013, foi apresentado o documento “Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório”. Neste documento é apresentada uma comparação entre os valores de refletância medidos por um espectrofotómetro UV-VIS-NIR (considerado como o mais preciso), segundo a norma ASTM E903, e um refletómetro solar portátil, segundo a norma ASTM C1549. As medições foram realizadas sobre três amostras revestidas a pastilha cerâmica com cores diferentes: branco, terracota e castanho. Sendo os resultados obtidos seguidamente apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Valores da refletância solar medidos pela norma ASTM E903 e ASTM C1549

	Refletância Solar (ρ)	
	Espetrofotómetro UV-VIS-NIR (ASTM E903)	Refletómetro Solar Portátil (ASTM C1549)
Branco	0,761	0,750
Terracota	0,458	0,458
Castanho	0,249	0,260

Fonte: Marinoski et al. (2013)

Assim sendo, no final das medições verificou-se entre os valores uma variação absoluta máxima de $\pm 0,011$, que em termos percentuais equivale a um erro médio inferior a 1,5% do refletómetro em relação ao espectrofotómetro (Marinoski et al., 2013).

No artigo científico “Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies”, de Akbari, Levinson e Stern (2008), é apresentado os resultados das medições de refletância solar de 14 amostras de telhas utilizando o método ASTM E1918 e o método alternativo E1918A. Comprovando-se assim que este método alternativo apresenta valores de refletância solar bastante próximos dos obtidos pelo método internacional. Posteriormente foram ainda realizadas medições utilizando o método ASTM E903 para comparar com os outros dois. No entanto, as novas amostras enviadas pelos fornecedores das telhas nas dimensões corretas (5x5 cm) para este método apresentavam em alguns casos diferenças visuais, o que introduziu alguma incerteza na comparação. No Quadro 7 o “*” corresponde a ligeiras

diferenças visuais, o “U” (unicolor) corresponde a amostras de uma só cor e o “M” (multicolor) amostra com várias cores.

Quadro 7 – Valores da refletância solar medidos pelos métodos ASTM E1918, E1918A e ASTM E903

Código das amostras		Refletância Solar (ρ)		
		Método ASTM E1918	Método E1918A	Método ASTM E903
CRRC01	U	0,32	0,32	0,37
CRRC02	M	0,23	0,22	0,17
CRRC03	U	0,32	0,30	0,31
CRRC04	M	0,25	0,22	0,32
CRRC05	U	0,50	0,49	0,55
CRRC06	U	0,10	0,09	0,10
CRRC07	M	0,33	0,37	0,38
CRRC08	M	0,29	0,28	0,27
CRRC09	M	0,19	0,19	0,16*
CRRC10	M	0,14	0,14	0,15*
CRRC13	M	0,32	0,34	0,37
CRRC14	M	0,20	0,22	0,24

Fonte: Akbari, Levinson e Stern (2008)

Em relação à comparação dos métodos ASTM E1918 e E1918A, verificou-se que o valor absoluto da diferença de valores da refletância solar, entre os dois métodos, não ultrapassava os 0,02 para amostras com uma só cor e os 0,03 quando as amostras individualmente tinham várias cores. A comparação destes dois métodos com o ASTM E903 ficou com alguma incerteza devido às diferenças verificadas entre as amostras

2.4.2. MEDIÇÃO “*IN SITU*” DA TEMPERATURA SUPERFICIAL

A temperatura superficial de uma fachada exposta à radiação solar depende de vários fatores. De facto, Barreira (2012) recorrendo ao programa de cálculo automático WUFI PRO 4.2 realizou um conjunto de simulações para avaliar a variação da temperatura superficial de uma parede, em função de um conjunto de parâmetros diferentes, face a uma situação padrão. Concluiu que os parâmetros que influenciam significativamente essa variação de temperatura são: a temperatura do ar exterior, a emissividade e o coeficiente de absorção dos materiais, a radiação solar global, a direção do vento, a radiação atmosférica e a espessura do reboco exterior (que contribui para a sua inércia térmica). Como tal, torna-se importante conhecer-se ao certo quais as temperaturas das superfícies em análise. Seguidamente são apresentados alguns exemplos destas medições realizadas “*In Situ*” por diferentes equipamentos e metodologias.

Ocaña, Guerrero e Requena (2004) utilizaram uma câmara termográfica infravermelha para obter imagens térmicas de dois edifícios em Espanha. Um dos edifícios corresponde a uma construção

tradicional de três pisos, cujas paredes ao nível do solo são de pedra escura à vista e de grande espessura, e nos restantes pisos as paredes são menos espessas e de tijolos de argamassa de barro, rebocados pelo exterior com argamassa de cal. O outro edifício corresponde a uma construção mais moderna, cujas paredes são duplas com tijolo à vista e com isolamento térmico na caixa de ar. As medições foram realizadas ao fim do dia e ao início da manhã para minimização de erros e são apresentados os resultados no Quadro 8.

Quadro 8 – Temperaturas das superfícies exteriores de dois edifícios medidos por câmara termográfica

		Temperaturas (°C)		
		R/C	1º Piso	2º Piso
Edifício Tradicional	Início da manhã	11,3	10,7	10,5
	Fim do dia	13,2	11,9	11,5
Edifício Moderno	Início da manhã		9,5	
	Fim do dia		10,2	

Fonte: Ocaña, Guerrero e Requena (2004)

Os autores concluíram que no edifício tradicional se verificava uma diferença de temperatura maior do r/c para os restantes pisos devido às diferenças na constituição das paredes (parede do r/c possui maior inércia térmica retendo mais calor), sendo que tal não se verificou no outro edifício. Foram também medidas as temperaturas interiores para estes períodos de tempo e conclui-se que o edifício mais antigo possuía uma menor diferença entre a temperatura exterior e a interior (3,5 °C ao fim da tarde), do que o edifício mais recente (8,5 °C ao fim da tarde).

Guimarães et al. (2002) analisaram as variações de temperatura em oito materiais diferentes expostos à radiação solar, sendo que para cada tipo de material foi ainda analisada a influência da sua orientação. A medição das temperaturas realizou-se utilizando um termómetro digital com mira a laser (pirómetro de radiação) e no período de tempo das 5:30h até às 21:00h. São seguidamente apresentadas no Quadro 9 as temperaturas máximas medidas em função da sua orientação.

Quadro 9 – Temperaturas superficiais médias em função da orientação

Materiais	Temperaturas (°C)							
	Norte		Este		Sul		Oeste	
	max	min	max	min	max	min	max	min
Blocos cerâmicos	52	13	46	13	41	14	42	13
Blocos de betão	51	11	40	11	43	12	43	10
Blocos de betão revestidos com argamassa	51	11	42	11	42	12	42	10
Peças cerâmica de cor branca aplicadas sobre blocos cerâmicos	39	14	37	14	36	14	36	15
Peças cerâmica de cor vermelho escuro aplicadas sobre blocos cerâmicos	46	15	44	14	38	15	41	14
Pintura branca de esmalte sintético aplicada em blocos cerâmicos	39	13	36	13	37	13	35	12
Pintura preta de esmalte sintético aplicada em blocos cerâmicos	55	14	49	14	43	14	44	13
Placas de betão armado	47	13	43	14	40	13	41	13

Fonte: Guimarães et al. (2002)

Nota 1: os valores do quadro são aproximados pois resultaram da interpretação de gráficos

Nota 2: as medições foram realizadas no hemisfério Sul

Os autores após as medições das temperaturas no período em análise realizaram a comparação de valores entre as diferentes orientações, entre os valores máximos e mínimos medidos e com a respetiva temperatura do ar exterior. Assim sendo, verificou-se que a orientação a sul, na maioria dos materiais, apresenta as menores temperaturas e a orientação a norte as maiores. As maiores variações de temperatura verificaram-se também a norte e na ordem dos 40 °C para as cores mais escuras. Note-se que, consoante a orientação das fachadas, estas vão estar expostas a valores diferentes de radiação solar global, de radiação atmosférica e da direção e intensidade do vento.

Radhi, Assem e Sharples (2014) avaliaram o comportamento térmico e a refletância de 32 materiais utilizados em superfícies exteriores de edifícios. A refletância foi obtida segundo o método ASTM E1980 e as temperaturas por uma câmara termográfica e um pirómetro de radiação infravermelha (medidos entre as 5h00 e as 24h00 durante o Verão). Seguidamente apresenta-se no Quadro 10 os valores de alguns dos materiais analisados.

Quadro 10 – Refletância e Temperatura de algumas das amostras avaliadas

Materiais	Refletância (%)	Temperatura (°C)	
		Máxima	Mínima
Painel de alumínio laranja	36	59	31
Feltro betuminoso de coberturas	23	64	28
Betão à vista	20	67	31
Betão pintado com tintas “frias”	70-88	56	31
Granito castanho	29-35	59	32
Granito laranja	33-35	63	30
Cerâmica castanha	27-30	56	29
Cerâmica laranja	30-35	53	30
Porcelana castanha	27-30	56	30
Porcelana laranja	30-35	55	29

Fonte: Radhi, Assem e Sharples (2014)

Nota: os valores das temperaturas são aproximados pois resultaram da interpretação de gráficos

Os autores concluíram que o desempenho térmico dos materiais é influenciado por dois fatores: primeiro pela radiação solar e condições ambientais, e segundo pelas propriedades térmicas e radiativas desses materiais. A título de exemplo, tem-se materiais diferentes (metal, granito e cerâmica) pintados da mesma cor (laranja) e com temperaturas superficiais diferentes.

Silva (2012) realizou a medição das temperaturas de provetes de pedra de Ançã, pintados em tinta acrílica com diferentes cores, expostos à radiação solar por um período de 10 minutos. As temperaturas das amostras foram medidas utilizando termopares e apresenta-se seguidamente no Quadro 11 os seus valores médios. A autora concluiu ainda que quanto maior o período de exposição à radiação solar maiores as diferenças de temperaturas dos provetes, pois mais evidente é o efeito da sua absorção. Note-se que, o crescimento destas temperaturas ocorre logaritmicamente e não exponencialmente.

Quadro 11 – Temperaturas máximas dos provetes pintados com diferentes cores

Cores	Preto	Branco	Vermelho	Amarelo
Temperatura medida pelos Termopares (°C)	29,1	27,1	27,4	27,1

Fonte: Silva (2012)

Uemoto, Sato e John (2010) investigaram o desempenho térmico de tintas acrílicas de cores “frias”, com pigmentos (“cool pigments”) que refletem a radiação infravermelha, em comparação com as convencionais tintas acrílicas de cores similares. Avaliaram a refletância UV/VIS/NIR com um espectrofotómetro segundo a norma ASTM E903, as temperaturas superficiais com termopares do tipo T ligados a um sistema de registo e a redução do fluxo de calor (com base numa fórmula aproximada) proporcionado pelas tintas. Foram analisadas seis amostras retangulares, de 4 cm por 5 cm, que foram

expostas durante uma hora e meia a uma lâmpada de radiação infravermelha. São apresentados seguidamente os resultados obtidos:

Quadro 12 – Temperaturas das seis amostras

Cores	Temperaturas °C				Redução do fluxo de calor (%)
	0,0h	0,5h	1,0h	1,5h	
Branco	22	70	75	75	23
Branco com pigmentos	22	62	64	65	37
Castanho	22	90	95	97	-32
Castanho com pigmentos	22	70	72	75	26
Amarelo	22	78	80	82	13
Amarelo com pigmentos	22	68	70	70	33

Fonte: Uemoto, Sato e John (2010)

Nota: os valores das temperaturas são aproximados pois resultaram da interpretação de gráficos.

Por análise do Quadro 12, conclui-se mais uma vez que o crescimento das temperaturas é logarítmico e que o branco com pigmentos é a tinta mais eficaz a reduzir o fluxo de calor ao longo das amostras. Por outro lado, apesar de o amarelo convencional ser mais claro que o castanho com pigmentos, não é tão eficiente a reduzir esse fluxo de calor. Assim sendo, a autora concluiu que as cores com estes tipos de pigmentos absorvem menos radiação solar e consequentemente alcançam menores temperaturas superficiais e reduz-se a energia transferida ao longo dos materiais.

2.4.3. EFEITO DA RADIAÇÃO E TEMPERATURA EM ACABAMENTOS DE SUPERFÍCIES

A radiação e a temperatura alcançada pelos acabamentos superficiais estão diretamente relacionadas, pois sabe-se que quanto maior incidência de radiação solar sobre os edifícios maiores serão as variações de temperatura nos seus materiais e consequentemente maiores variações volumétricas (contrações e dilatações). Segundo Thomaz (1989) estas variações de temperatura, nos revestimentos exteriores das fachadas, quando são muito acentuadas e existe restrição dos seus elementos origina tensões significativas e consequentemente anomalias que comprometem as suas funções. Note-se que, além da intensidade da radiação solar e das restrições dos materiais, essas variações volumétricas estão também dependentes das suas propriedades físicas e cores. De facto, segundo o autor a amplitude térmica atingida depende de três fatores: intensidade solar, absorvância e emitância das superfícies dos revestimentos das fachadas.

Apresenta-se seguidamente alguns dos efeitos e anomalias em revestimentos de fachadas devido à exposição à radiação solar e variações de temperaturas, já analisados e publicados por investigadores da área.

Matos e Lima (2006) avaliaram a importância de considerar os fatores ambientais, como as variações de temperatura, na avaliação de fachadas. Consideraram de uma forma geral que as variações ambientais causavam dilatações e contrações dos materiais que dependiam dos seus coeficientes de dilatação térmica e das técnicas de construção utilizadas. Sendo os revestimentos de fachadas os elementos que

estão sujeitos às maiores variações de temperaturas são também os que sofrem de maiores variações dimensionais, e consequentemente de patologias como fissurações. No Quadro 13 é exposto um exemplo, apresentado pelos autores, das dilatações atingidas por três tipos de materiais utilizados em fachadas quando expostos a um gradiente de temperatura de 65°C:

Quadro 13 – Dilatações térmicas de materiais utilizados em fachadas

	Coefficiente de dilatação térmica [m/m °C]	Dilatação por metro [mm]	Dilatação absoluta numa fachada de 20 m [mm]
Parede de tijolo	0,5*10 ⁻⁵	0,325	6,5
Parede de blocos de betão	1,0*10 ⁻⁵	0,650	13,0
Revestimento de pedra	0.5*10 ⁻⁵	0,325	6,5

Fonte: Matos e Lima (2006)

Bernardes (1998) analisou a ocorrência de fissurações nas argamassas utilizadas para revestimentos de fachadas. Como tal, concluiu que estas patologias ocorriam devido às variações de temperatura acentuadas e como forma de serem evitadas aconselha a adotar-se dosagens adequadas para as argamassas. Por outro lado, evidenciou que as fissurações estão ainda relacionadas com o módulo de deformação das argamassas, uma vez que, se a sua capacidade de deformar for inferior à da parede haverá risco de fissuração, devendo assim superar com boa folga a da parede. Também já Thomaz (1989) havia referido que as fissurações nas argamassas de revestimentos depende essencialmente do seu módulo de deformação.

Chew (1992) avaliou o efeito que os gradientes de temperatura provocam na aderência de placas cerâmicas utilizadas como revestimentos de fachadas. Os ensaios efetuados consistiram em submeter essas placas, fixadas com argamassas diferentes, a 100 ciclos de aquecimento e arrefecimento, e posteriormente comparar a sua aderência com placas de referência (não submetidas a esses ciclos). O autor concluiu que de uma forma geral se verificou uma redução de 20% na aderência das placas em comparação com as de referência. Posteriormente, Fiorito (1994) avaliou o risco de descolamento e fendilhação de revestimentos cerâmicos aplicados em fachadas. Concluiu que tal acontece quando as peças são solicitadas à compressão, ou seja, quando ocorrem variações dimensionais de expansão. De facto, essas variações dimensionais e respetivas patologias ocorrem essencialmente devido às variações de temperatura acentuadas a que são sujeitas (durante o dia expostas a radiação solar intensa e durante a noite as temperaturas baixam bastante criando um grande diferencial de temperatura). Por outro lado, Paes e Carasek (2002) também analisaram estes revestimentos cerâmicos de fachadas e concluíram que a inexistência de juntas entre peças deve ser evitado ao máximo e caso existam, o sistema apresenta sempre um melhor comportamento quanto maior a sua espessura e flexibilidade do material das juntas. De facto, nos casos analisados em que se utilizou juntas espessas e flexíveis não se verificou durante os ensaios falhas na aderência nem fissurações. Além disso, o módulo de elasticidade da argamassa utilizada para colar as peças cerâmicas e sua espessura de emboço são também propriedades importantes a considerar.

Dornelles e Sichieri (2014) avaliaram os efeitos das condições ambientais sobre a refletância de tintas de cores claras utilizadas em coberturas, uma vez que, ao longo do tempo a refletância dos materiais claros diminui (situação desvantajosa) e dos materiais escuros aumenta. Utilizou-se como base das

amostras 9 peças cerâmicas de 8x8 cm que foram pintadas com tintas brancas (1 com tinta acrílica convencional, 2 com tinta acrílica com “cool pigments” e 6 com tinta refletiva com microesferas cerâmicas) e que ficaram expostas aos agentes atmosféricos durante 12 meses. A refletância das amostras foi medida no início e de 3 em 3 meses durante o período de análise por um espectrofotômetro segundo a norma ASTM E903. Concluiu-se que para todas as amostras se verificou uma diminuição significativa nas suas refletâncias, sendo que a tinta convencional foi a que apresentou a menor redução e a tinta com microesferas cerâmicas apresentou a maior redução (essas microesferas aumentam a rugosidade superficial que afeta a degradação da refletância). Assim sendo, a exposição aos agentes atmosféricos origina uma degradação das refletâncias dos materiais claros ao longo do tempo.

3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL E MATERIAIS

3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1.1. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA SOLAR DAS AMOSTRAS SEGUNDO O MÉTODO ALTERNATIVO E1918A

A medição da refletância solar “*In Situ*” foi realizada segundo o método alternativo E1918A que apresenta a seguinte metodologia de ensaio:

- i. Posicionar o piranômetro sobre o centro da amostra a medir;
- ii. Colocar sobre a amostra a ensaiar a máscara preta opaca e seguidamente sobre esta a máscara branca opaca;
- iii. Virar o piranômetro para cima com o intuito de medir a irradiância solar total que incide na superfície horizontal das amostras (I_H);
- iv. Virar o piranômetro para baixo para medir a irradiância solar refletida pela máscara branca opaca (I_1), seguidamente remove-se esta máscara e mede-se a irradiância solar refletida pela máscara preta opaca (I_2) e por último retira-se esta máscara e mede-se a irradiância solar refletida pela amostra em análise (I_3);
- v. Voltar a virar o piranômetro para cima para medir novamente a irradiância horizontal solar total (I'_H). Sendo que, se $|I'_H - I_H| > 20 \text{ Wm}^{-2}$ repetem-se os passos de 2) a 5);
- vi. As medições anteriores devem ser efetuadas num intervalo de tempo que não exceda os 10 minutos e entre elas deve-se aguardar pelo menos 30 segundos para o piranômetro estabilizar;
- vii. Após as medições anteriores estarem efetuadas calcula-se a refletância solar da amostra pela seguinte expressão (sendo que R_b e R_w já são conhecidos, uma vez que, foram medidos pelo método ASTM E903):

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$$

- viii. Repetir os passos de 2) até 7) para obter um total de três medições da refletância solar da amostra, sendo a média a respetiva refletância solar;
- ix. Se o intervalo de valores dessas três medições de refletância solar exceder 0,02, isto é, $(R_t)_{\max} - (R_t)_{\min} > 0.02$, deve-se repetir os passos de 2) até 8).

Na Fig. 17 é apresentado um esquema desta metodologia de ensaio:

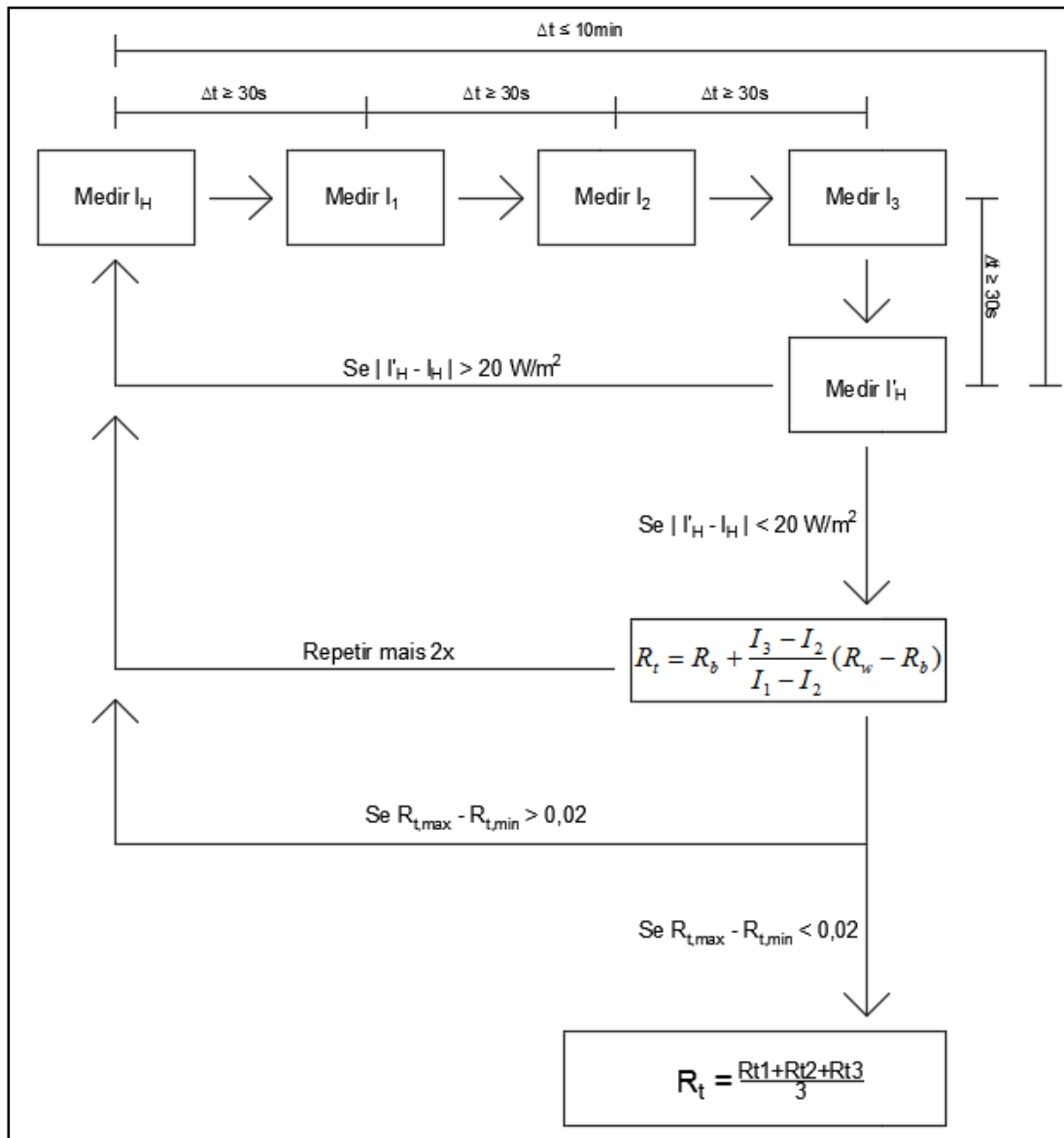


Fig. 17 – Esquema da metodologia de ensaio

Por outro lado, tal como se viu anteriormente no subcapítulo 2.2.5, para medir a refletância solar “*In Situ*”, recorrendo a este método alternativo, é necessário que no momento de medição o céu esteja ensolarado, sem nuvens ou neblina e que o ângulo do sol com a normal da superfície das amostras seja inferior a 45°, ou seja, entre as 9h00 e as 15h00.

3.1.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS

A temperatura superficial das amostras foi medida “*In Situ*” recorrendo a dois equipamentos de medição: Termopares Tipo T ligados a um sistema de aquisição de dados da marca da Technetics (Mikromec Logger Multisens) e Termopares Tipo K ligados a um sistema de aquisição de dados da marca ONSET (HOBO 4-Channel Thermocouple Data Logger).

Apresenta-se seguidamente a metodologia de ensaio:

- i. Inicialmente vão-se instalar todos os termopares no interior de uma câmara climática a temperatura constante ($T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$), com o intuito de avaliar se todos estão a funcionar corretamente e quais as variações entre os valores de temperatura medidos num clima controlado;
- ii. Seguidamente, esses mesmos termopares (após se confirmar o seu correto funcionamento) serão instalados na superfície de uma das amostras à escolha. Mais uma vez, os principais objetivos são confirmar que durante a sua instalação no local de ensaio nenhum dos termopares se danificou e avaliar as variações entre os valores de temperaturas (agora num clima não controlado);
- iii. Por último, assegurado o correto funcionamento dos termopares, estes serão distribuídos pelas superfícies das amostras. Sendo que, pretende-se instalar em cada amostra dois termopares do Tipo T e um termopar do Tipo K, para cálculo do valor médio das temperaturas superficiais. Numa situação ideal, na qual todos os termopares funcionam corretamente e dão valores próximos entre si, ter-se-ia 16 do Tipo T e 8 do Tipo K. Assim sendo, no máximo podia-se medir em simultâneo 8 amostras o que implica a medição dessas temperaturas por etapas.

3.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E AMOSTRAS DE ENSAIO


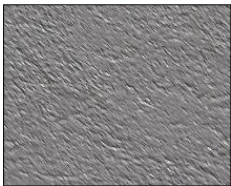
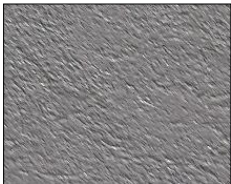

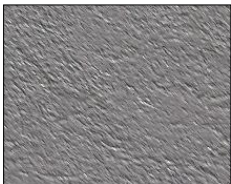
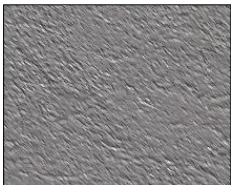
3.2.1. ENQUADRAMENTO

Neste presente capítulo vai-se proceder à apresentação e descrição das amostras que vão ser utilizadas posteriormente para a realização dos ensaios. Tendo como objetivo avaliar o comportamento do ETICS e do Sistema com Reboco Térmico quando sujeitos à ação da temperatura, com revestimentos superficiais iguais e cores diferentes, vão então ser produzidas amostras de ambos os sistemas. Por outro lado, sendo a presente dissertação realizada em colaboração empresarial com a “SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL”, contou-se desde início com todo o apoio da empresa para o fornecimento dos materiais e a elaboração das amostras de ensaio nas suas instalações.

Assim sendo, foram propostas a realização de 13 amostras, das quais 11 serão em ETICS e 2 em Sistema com Reboco Térmico. Estas amostras serão pintadas com cores diferentes dentro do catálogo de cores da própria empresa. Apresenta-se seguidamente no Quadro 14 as informações gerais sobre essas amostras.

Quadro 14 – Informações gerais das amostras de ensaio

Cor do revestimento	Referência da cor	Fotografia da cor	Tipo de Sistema	α_{nominal}
Branco	0919		ETICS	0,17
Pastel	0839		ETICS	0,24
Azul	1774		ETICS	0,52
Verde	1436		ETICS	0,63
Castanho	0426		ETICS	0,76
Tijolo	0555		ETICS	0,80
“Wengué”	0412		ETICS	0,85

Cor do revestimento	Referência da cor	Fotografia da cor	Tipo de Sistema	α_{nominal}
Vermelho	0444		ETICS	0,86
Preto	3500		ETICS	0,90
Preto com “cool pigments”	3500		ETICS	-
Vermelho com “cool pigments”	0444		ETICS	-
Preto	3500		Reboco Térmico	0,90
Preto com “cool pigments”	3500		Reboco Térmico	-

Note-se que, os α_{nominal} apresentados no Quadro 14 foram valores indicados pela “SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL” e servem apenas para posterior comparação com os resultados dos ensaios.

Por outro lado, como foi descrito no subcapítulo 3.1, vai-se utilizar o método alternativo E1918A para medição da refletância solar dessas amostras. Como tal, este método condiciona a que as dimensões das amostras tenham no mínimo 1 m². Como tal, estas foram produzidas com forma quadrada de um metro por um metro.

3.2.2. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

Seguidamente vai-se proceder à descrição detalhada de todo o processo de produção das amostras dos dois tipos de sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Como se irá constatar, entre eles existem algumas semelhanças, mas também apresentam diferenças significativas.

3.2.2.1. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE ETICS

O ETICS que é aplicado num edifício, por exemplo nas suas fachadas, é constituído por várias camadas, como se viu no capítulo 2.1.1.1. Na empresa “SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL” a designação comercial deste sistema é “weber.therm classic”, certificado pelo LNEC (membro da EOTA) na ETA 11/0287.

Assim sendo, nesta fase de produção das amostras começou-se por definir qual seria a sua primeira camada, sendo adotado o próprio isolamento térmico. De facto, apesar das grandes dimensões das amostras não foi necessária uma camada de suporte para rigidez, uma vez que, após estarem concluídas e devidamente secas além do seu peso reduzido possuíam também a resistência necessária para serem movimentadas sem deformar-se ou até mesmo partir-se. Porém, este peso reduzido apresenta-se também como uma desvantagem devido à realização das medições no exterior, uma vez que, a ocorrência de ventos fortes podia levantar as placas do local de ensaio. Assim sendo, teve de ser definido um mecanismo auxiliar de fixação destas amostras, como se verá mais à frente.

O isolamento escolhido para realização das amostras foi o poliestireno expandido, “weber.therm EPS”, fornecido em placas de dimensões de 1,0 m por 0,5 m e com 4 cm de espessura, tal como se pode observar na Fig. 18. Assim sendo, foi necessário proceder à união de duas destas placas para se obter as amostras de 1 m². No Quadro 15 são ainda apresentadas algumas propriedades gerais deste isolamento.



Fig. 18 – Duas placas de EPS separadas

Quadro 15 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm EPS”

Propriedades	Unidade	EPS 100	Norma
Condutibilidade térmica	W/m°C	0,036	EN 12667
Massa volúmica aparente	kg/m ³	19±1	EN 1602
Coeficiente de dilatação térmica linear	m/m°C ⁻¹	5-7(*10 ⁻⁵)	-
Resistência à compressão	kPa	100	EN 826
Fator de Resistência à difusão do vapor de água	-	30-70	EN 12086
Absorção de água por imersão	% vol.	<2	EN 12087
Classe de reação ao fogo	-	Euroclasse E	EN 13501-1

Fonte: WEBER (2015) e LNEC (2011)

As placas foram coladas entre si com recurso ao produto “weber.col rapid”, sendo apresentadas no Quadro 16 algumas das suas propriedades gerais. Este produto foi escolhido por se tratar de um cimento-cola de rápida secagem, com elevada aderência e sobretudo por não causar a degradação das placas de EPS. Trata-se de um produto de cor bege fornecido em sacos de 25 kg e constituído por cimento branco, aditivos orgânicos e/ou inorgânicos e inertes.

Quadro 16 – Propriedades gerais sobre o “weber.col rapid”

Propriedades	Unidade	Valor
Densidade aparente	kg/m ³	1,30 - 1,50
Temperatura de aplicação	°C	5 - 30
Espessura máxima de aplicação	mm	5
Tempo de vida do amassado	h	1
Tempo de ajustabilidade	min	30
Classe de Reação ao fogo	-	E
Aderência inicial	MPa	≥ 1

Fonte: WEBER (2015)

Seguidamente apresenta-se o procedimento de preparação do produto:

- 1º - O produto é inicialmente pré-misturado com água limpa (20,5% do seu peso);
- 2º - Durante um período de 30 segundos é misturado num misturador elétrico de baixa rotação, como se pode observar na Fig. 19;



Fig. 19 – Misturadora elétrica

- 3º - Durante 1 minuto é misturado à mão, de forma a garantir que no fundo do recipiente o produto está bem misturado com a água;
- 4º - Procede-se novamente à utilização do misturador elétrico, agora por um período de 1 minuto;
- 5º - Deixa-se repousar a mistura durante 2 minutos;
- 6º - Por último, volta-se a recorrer ao misturador elétrico durante 15 segundos.

Concluída a preparação deste cimento-cola deve-se primeiro certificar que a mistura é fluida e sem grumos, e só depois se procede à sua aplicação num dos bordos das placas de EPS para realizar a sua união. Após a execução dessa união deve-se ainda realizar a compressão das placas uma contra a outra, uma vez que, a sua espessura máxima de aplicação é de 5mm.



Fig. 20 – Aplicação do cimento-cola e união das placas de EPS

Como se pode observar pela Fig. 20, foi colocado na união das placas cimento-cola em excesso, como forma de garantir que havia material e aderência ao longo de todo o bordo, e com a posterior compressão esse excesso era expelido para o exterior. Após esta junção de placas foi ainda aplicada uma rede de fibra-de-vidro com o cimento-cola, em ambas as faces da união como forma de reforçar essa ligação, como se pode observar na Fig. 21. Esta rede designada de “weber.therm rede normal” é utilizada para aplicação em zonas correntes dos edifícios e possui uma proteção antialcalina.

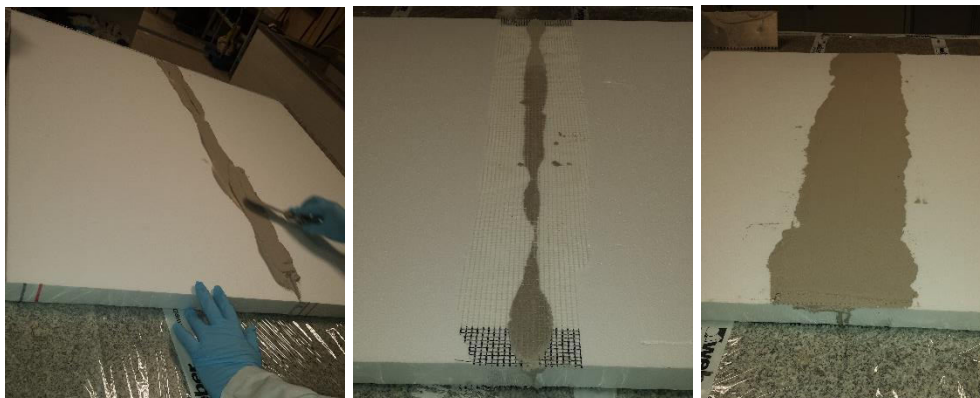


Fig. 21 – Reforço da ligação das placas de EPS com rede fibra-de-vidro

Quadro 17 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm rede normal”

Propriedades	Unidade	Valor
Dimensões dos rolos	m	1 x 50
Abertura da malha	mm	5 x 4
Peso	g/m ²	160 (±5%)
Alongamento à rotura	%	2,9
Resistência química	-	Boa aos alcalis

Fonte: WEBER (2015)

Após a realização das ligações das placas de isolamento das 11 amostras de ETICS deixou-se secar o cimento-cola durante algum tempo, sendo que se trata de um produto de secagem rápida. Posteriormente iniciaram-se os trabalhos de preparação da camada de base deste sistema. O produto utilizado foi o “weber.therm pro” (Fig. 22), sendo apresentado no Quadro 18 algumas das suas propriedades gerais. Corresponde a uma argamassa de cor cinzenta composta por cimento, resinas, cargas minerais, aditivos especiais e fibras sintéticas. Trata-se de um produto de elevada aderência, impermeável à água da chuva e fornecido em pó também em sacos de 25kg (LNEC, 2011).

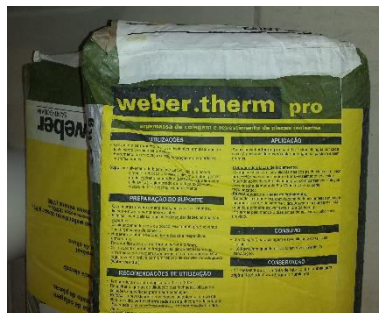


Fig. 22 – Sacos de 25kg do “weber.therm pro”

Quadro 18 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm pro”

Propriedades	Unidade	Valor
Massa volúmica aparente	kg/m ³	1400
Aderência sobre placas de EPS (rotura pelo EPS)	N/mm ²	≥ 0,15
Fator de resistência à difusão do vapor de água	-	≤ 20
Absorção de água por capilaridade	-	W2
Classe de Reação ao fogo	-	F
Espessura mínima de revestimento sobre as placas de EPS	mm	2,5
Tempo de espera para revestir	dias	3
Temperatura de aplicação	°C	5 - 30

Fonte: WEBER (2015)

O procedimento de preparação desta argamassa é semelhante ao do “weber.col rapid” mudando apenas a percentagem de água limpa a ser adicionada para cerca de 25%. Concluída a mistura do “weber.therm pro” com a água deve-se mais uma vez certificar que a pasta obtida não apresenta grumos, que é homogênea e gordurosa. Neste caso como as quantidades a serem produzidas eram muito superiores utilizou-se um recipiente de maiores dimensões, capaz de levar de uma só vez os 25kg do produto com os 6 a 7 litros de água, e outro tipo de misturador elétrico (Fig. 23).



Fig. 23 – Mistura do “weber.therm pro” com a água

Estando pronta a ser aplicada espalha-se então essa argamassa sobre as placas de EPS, com a face lisa de uma talocha denteada (6mm) ou com uma colher de pedreiro, formando uma camada com cerca de 1,5 mm (1ª imagem da Fig. 24). Seguidamente é regularizada com a face denteada da talocha (2ª imagem da Fig. 24) e coloca-se a rede de fibra-de-vidro, “weber.therm rede normal”, que vai reforçar esta camada de base do sistema (1ª imagem da Fig. 25). Por último, realiza-se a execução da segunda camada, também com cerca de 1,5 mm e com o mesmo material, através de várias passagens e com o intuito de recobrir por completo a armadura dessa camada de base (2ª imagem da Fig. 25).

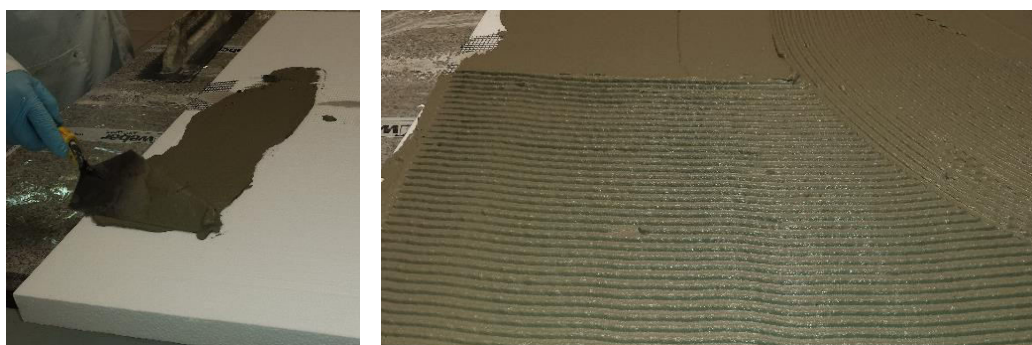


Fig. 24 – Espalhamento e regularização da argamassa



Fig. 25 – Aplicação da armadura e da regularização final da camada de base

Após a regularização final da camada de base deve-se esperar pelo menos 3 dias antes de se aplicar o revestimento final previsto. Note-se que, antes de ser aplicado deve-se ainda passar uma talocha abrasiva na camada de base para eliminar pequenas irregularidades superficiais. Esta camada de acabamento será seguidamente analisada de forma mais detalhada.

3.2.2.2. PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DO SISTEMA COM REBOCO TÉRMICO

O Sistema com Reboco Térmico, designado pela empresa como sistema “weber.therm mechanic”, trata-se de uma solução com isolamento mineral e constituída por várias camadas, tal como o ETICS. No entanto procura dar respostas a algumas das suas desvantagens. De facto, esta solução apresenta uma maior facilidade de adaptação e aplicação em paredes antigas de superfícies irregulares e maior resistência aos impactos.

Na preparação das duas amostras destes sistemas também se considerou, tal como nas do ETICS, que a primeira camada seria a do isolamento térmico. De facto, após estarem concluídas e devidamente secas possuíam também a resistência necessária para serem movimentadas sem deformar-se ou partir-se. Porém, a grande diferença entre os dois sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior está nesta camada. Enquanto que a camada de isolamento térmico das amostras de ETICS eram materializadas com placas rígidas pré-fabricadas de EPS, a mesma camada no Sistema com Reboco Térmico é concebida com uma argamassa de cal, baseada num reboco de elevada eficiência térmica, que é aplicado por projecção manual ou mecânica. Note-se que, nestas duas amostras será também aplicado o mecanismo auxiliar de fixação.

Assim sendo, como a primeira camada corresponde a uma argamassa isolante começou-se então por preparar dois moldes que garantissem que as amostras tinham 1 m². Posteriormente iniciou-se a preparação do produto, cuja designação é “weber.therm aislone”, e cujo procedimento é semelhante ao do “weber.col rapid” e “weber.therm pro” só que com uma percentagem de água limpa de 20% por saco (cerca de 6 litros). Trata-se de uma argamassa termo isolante de cor amarela, de baixa densidade, com boa resistência superficial quando endurecido, elevada permeabilidade ao vapor de água e fornecida em sacos de 30 l (4,6 kg). O reboco isolante é constituído por cal como ligante mineral, por cargas minerais, aditivos especiais e cargas leves. Esta camada foi executada em dois estratos de 2 cm cada e entre eles foi ainda aplicada uma rede de fibra de vidro com malha de 10 mm por 10 mm, para fornecer o reforço necessário à posterior movimentação das amostras, tal como se pode observar na Fig. 26. No Quadro 19 pode-se ainda observar algumas propriedades gerais deste produto.



Fig. 26 – Mistura do produto com água, sua aplicação e respetivo reforço com a rede fibra de vidro

Quadro 19 – Propriedades gerais sobre o “weber.therm aislone”

Propriedades	Unidade	Valor
Massa volúmica da pasta	g/cm ³	0,35±0,075
Massa volúmica endurecido	g/cm ³	0,15±0,050
Condutibilidade térmica	W/m°C	0,042
Fator de resistência à difusão do vapor de água	-	≤ 5
Classe de Reação ao fogo	-	B
Capilaridade	kg/m ² .min ^{0.5}	≤ 0,4 (W1)
Espessura máxima de aplicação por camada	mm	40
Espessura máxima de aplicação	mm	80
Espessura mínima de aplicação	mm	30
Tempo de espera entre camadas	h	12 - 14
Tempo de espera para revestir	dias por cm de espessura	1
Temperatura de aplicação	°C	5 - 30

Fonte: WEBER (2015)

Concluída a aplicação dos 4 cm de espessura do produto, para materializar esta camada de isolamento térmico, foi necessário esperar pelo menos 4 dias antes de se aplicarem as camadas seguintes do sistema. Com esta camada devidamente seca começou-se então por realizar os trabalhos de produção da camada de base. Os produtos utilizados, procedimentos de preparação e aplicação foram exatamente os mesmos que os aplicados nas amostras do ETICS, “weber.therm pro” e “weber.therm rede normal” (Fig. 27).



Fig. 27 – Espalhamento da argamassa, aplicação da armadura e regularização final da camada de base

Terminada a regularização final desta camada de base deve-se esperar pelo menos 3 dias antes de se aplicar o acabamento previsto. Esta camada de revestimento final será seguidamente analisada de forma mais detalhada.

3.2.2.3. REVESTIMENTO FINAL DAS AMOSTRAS DE ETICS E SISTEMA COM REBOCO TÉRMICO

Como se viu no capítulo 2.1.1.1 existem diferentes tipos de acabamentos finais que podem ser aplicados nestes sistemas. No entanto optou-se pela escolha dos revestimentos plásticos espessos (RPE), uma vez que, iam de encontro com os objetivos da análise experimental pretendidos. Assim sendo, dentro deste tipo de acabamentos a empresa “SAINT-GOBAIN WEBER PORTUGAL” possui duas alternativas de escolha: “weber.plast decor” e “weber.plast gran”.

O “weber.plast gran” é um revestimento orgânico decorativo de capa fina, aplicado com uma talocha de aço inoxidável e fornecido em baldes de 25 kg. A sua composição é de polímeros sintéticos em emulsão aquosa, granulados coloridos de mármore calibrados (Fig. 28) e aditivos específicos (WEBER, 2015). No Quadro 20 apresentam-se ainda algumas das suas propriedades gerais.

Quadro 20 – Propriedades gerais sobre o “weber.plast gran”

Propriedades	Unidade	Valor
Aderência	MPa	≥ 0,3
Fator de resistência à difusão do vapor de água	-	< 20
Absorção de água	-	Classe W2 (Média)
Classe de Reação ao fogo	-	A2-s1, d0
Espessura de aplicação	mm	2 a 3
Tempo de secagem (consoante a temperatura e a humidade)	h	8 - 48
Tempo de acabamento	min	30 - 60
Temperatura de aplicação	°C	5 - 30

Fonte: (WEBER, 2015)



Fig. 28 – Exemplos de acabamentos do “weber.plast gran”

O “weber.plast decor” trata-se de um revestimento orgânico de capa fina, pode ser aplicado tanto no interior como no exterior de paredes, possui grande resistência superficial e flexibilidade. Este revestimento colorido é também fornecido em baldes de 25kg, possui uma textura de acabamento em talochado médio (M) ou fino (F) e a seguinte composição: resinas em dispersão aquosa, cargas minerais, pigmentos, aditivos, agentes antifúngicos e outros (WEBER, 2015). No Quadro 21 apresentam-se algumas das suas propriedades gerais.

Quadro 21 – Propriedades gerais sobre o “weber.plast decor”

Propriedades	Unidade / Norma	Valor
Massa volúmica	kg/m ³	1700 - 1800
Granulometria máxima	Versão M	1,5
	Versão F	1,0
Permeabilidade ao vapor de água	NP EN 15824	Classe V2 (Média)
Difusão equivalente à espessura da camada de ar	EN ISO 7783-2	$0.14 \leq S_d < 1.4$ m
Taxa de transmissão do vapor de água	EN ISO 7783-2	$15 < V \leq 150$ g/(m ² .d)
Absorção de água	NP EN 15824	Classe W3 (Baixa)
	EN 1062-3	$W \leq 0,1$ kg/(m ² .h ^{0.5})
Classe de Reação ao fogo	EN 13501-1	C
Espessura de aplicação	mm	1 - 2
Tempo de secagem (consoante a temperatura e a humidade)	h	6 - 48
Tempo para acabamento	min	10 - 20
Temperatura de aplicação	°C	5 - 30

Fonte: WEBER (2015) e IPQ (2011)



Fig. 29 – Aplicação do “weber.plast decor M” nas amostras de ensaio

O revestimento final escolhido para aplicação nas amostras de ensaio foi o “weber.plast decor” versão M (textura média), uma vez que, possuía uma variedade de cores muito superior (mais de 100 cores) que o “weber.plast gran” (16 cores). Na Fig. 29 é apresentada uma das cores escolhidas e respetiva forma de aplicação.

Assim sendo, no que respeita às cores escolhidas para a camada de acabamento das onze amostras de ETICS, como foi apresentado no subcapítulo 3.2.1, foram escolhidas nove cores diferentes e outras duas cores que visualmente são iguais, mas na sua constituição possuem “cool pigments” que aumentam a sua refletância. Assim sendo, temos as cores preto e preto com “cool pigments”, e as cores vermelho e vermelho com “cool pigments”, com o intuito de avaliar o acréscimo de refletância introduzido por esses

pigmentos. Por outro lado, as cores seleccionadas para as amostras do Sistema com Reboco Térmico foram o preto e o preto com “cool pigments”.

Os “cool pigments” utilizados nos revestimentos são da marca “Chromaflo Technologies” e são designados de “Navapint D Solar Reflective”. Estes “cool pigments” resultam de uma combinação dos pigmentos convencionais utilizados em fachadas, que possuem boa reflexão solar, com um pigmento preto refletivo na zona do infravermelho próximo, designado de D803 (Technologies, 2014).

Por último, importa também referir que podia-se ter optado por outro tipo de acabamento, como por exemplo os revestimentos minerais coloridos de camada fina, designados de “weber.rev naturkal”. Acabamento à base de cal com textura areado fino ou alisado, não necessita de aplicação de primário, porém apresenta pouca variedade de cores (8 cores).

3.2.3. SISTEMA AUXILIAR DE FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os ensaios a realizar sobre estas amostras serão efetuados no exterior e será necessário definir um mecanismo auxiliar para a sua fixação. Tal deve-se ao facto de possuírem grandes dimensões (1 m²) e um peso reduzido, que as torna suscetíveis de sofrerem deslocações indesejadas pela ação do vento.

Assim sendo, as amostras a ensaiar serão fixadas mecanicamente nos seus cantos a placas de betão, de 40 por 40 cm, utilizando buchas de plástico e pregos de expansão (Fig. 30). Este sistema de fixação mecânica é designado de “weber.therm bucha SPIT”, certificado pelo CSTB (membro da EOTA) na ETA 04/0076.

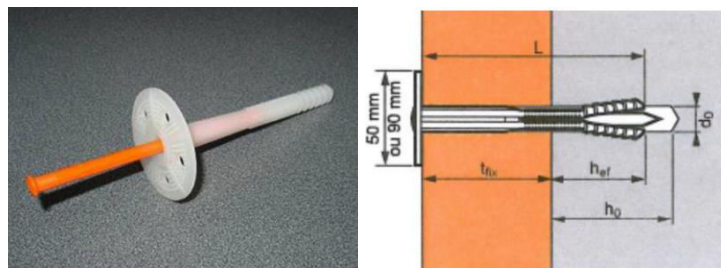


Fig. 30 – “Weber.therm bucha SPIT” (LNEC, 2011; WEBER, 2015)

A metodologia de fixação destas placas é:

- 1º - Posicionar as placas de fixação no local de ensaio, com as distâncias adequadas entre elas, e seguidamente as amostras sobre essas placas (apresenta-se na Fig. 33 o respetivo esquema de posicionamento);
- 2º - Realizar um furo com um berbequim de diâmetro adequado (cerca de 10 mm) em cada um dos cantos das placas de fixação (Fig. 31);



Fig. 31 – Realização dos furos das amostras com berbequim

- 3º - Inserir nesse furo uma bucha expansível de polipropileno, com ajuda de martelo;
- 4º - Inserir o prego de expansão, em poliamida reforçada com fibra-de-vidro, e martelar até este encostar à superfície da respectiva bucha (Fig. 32).



Fig. 32 – Inserção do prego de expansão

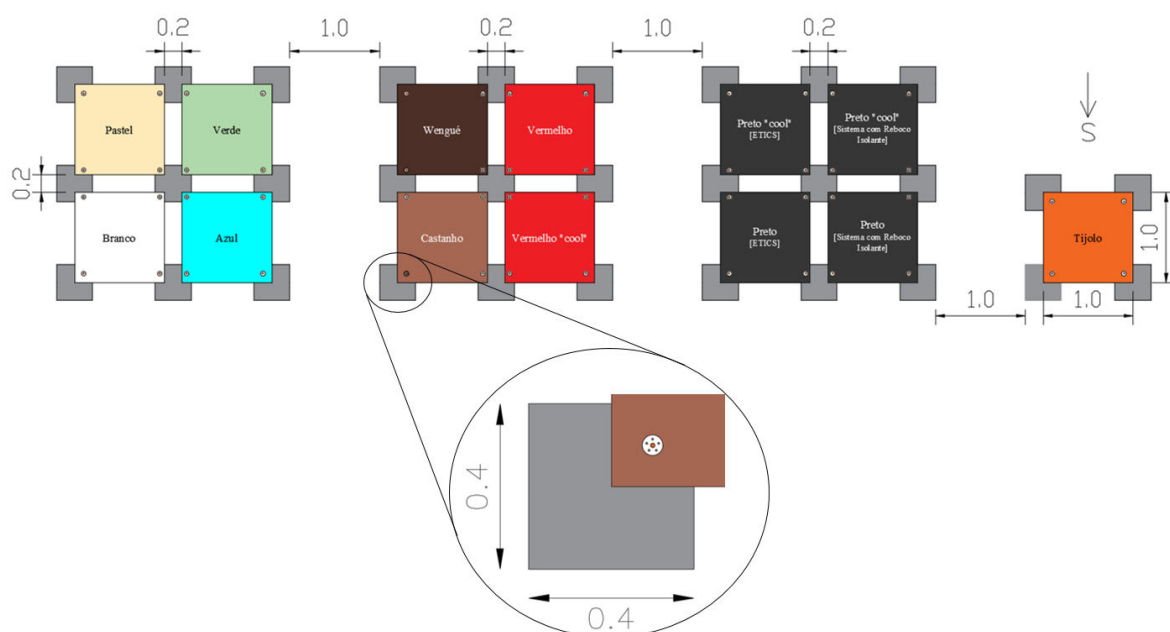


Fig. 33 – Esquema de posicionamento das amostras no local de ensaio



Fig. 34 – Amostras no local de ensaio

3.3. INFRAESTRUTURA EXPERIMENTAL

3.3.1. PIRANÔMETRO SR05 DA HUKSEFLUX THERMAL SENSORS

Tal como anteriormente foi definido, para a medição da refletância solar das amostras “*In Situ*” vai-se recorrer ao método alternativo E1918A que consiste na utilização de um piranómetro. O equipamento escolhido para realização destas medições é da marca Hukseflux Thermal Sensors e o seu modelo é o SR05 (Fig. 35).



Fig. 35 – Piranómetro SR05 da Hukseflux Thermal Sensors (Hukseflux)

Trata-se de um piranómetro com sensor de termopilha, como tal é abrangido pela norma ISO 9060 e classificado por ela como sendo “**second class**”, e segundo a classificação da WMO apresenta-se como um piranómetro de **qualidade moderada**. Permite a medição da radiação solar (W/m^2) e radiação refletida (W/m^2) por uma superfície horizontal com ângulo de visão de 180° . No Quadro 22 são apresentadas algumas das suas especificações:

Quadro 22 – Especificações do piranómetro SR05 da Hukseflux Thermal Sensors

Especificações	Valor
Incerteza de calibração [a]	$< 1,8\%$ ($k = 2$)
Tempo de resposta (95%)	18 s
“Zero offset a” (resposta a 200 W/m^2 de radiação térmica)	$< 15 \text{ W/m}^2$
“Zero offset b” (resposta a mudança de 5 K/h na temperatura ambiente)	$< \pm 4 \text{ W/m}^2$
Mudança de sensibilidade por ano (“non stability”) [d]	$< \pm 1\%$
Não-linearidade	$< \pm 1\%$ (100 a 1000 W/m^2)
Resposta direcional [b]	$< \pm 25 \text{ W/m}^2$
Resposta de temperatura [c]	$< \pm 3\%$ (-10 a $+40^\circ\text{C}$)
Seletividade espectral	$< \pm 5\%$ ($0,35$ a $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}$)
Resposta à inclinação	$< \pm 2\%$ (0 a 90° para 1000 W/m^2)
Faixa de medição	0 a 2000 W/m^2
Gama espectral	285 a $3000 \times 10^{-9} \text{ m}$

Especificações	Valor
Faixa de temperatura operacional	-40 a +80 °C
Resolução das medições de irradiância	0,2 W/m ²
Calibração interna do equipamento	2 anos

Fonte: (Hukseflux)

Tal como já foi referido no capítulo 2.2.6, pode-se estimar de forma aproximada a precisão das medições do piranómetro pela seguinte expressão:

$$P = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2} = \sqrt{1,8^2 + 2,5^2 + 3^2 + 1^2} = 4,4\% \quad (21)$$

Note-se que, algumas fontes de incerteza não são incluídas no cálculo, como por exemplo a não-linearidade porque já está incluído na resposta direcional e a resposta espectral porque já foi considerada nos processos de calibração.

Para a realização destas medições será também necessária uma estrutura de suporte onde se vai fixar o piranómetro. Será semelhante à que o Método ASTM E1918, no qual se baseia este método alternativo, propõe para realização destes ensaios. Assim sendo, esta estrutura vai garantir que a distância de 50 cm às amostras a ensaiar é cumprida e deve ser concebida de forma a provocar a menor sombra possível sobre elas. Assim sendo, tem-se na Fig. 36 um esquema da estrutura desenvolvida e na Fig. 37 duas fotografias dessa estrutura durante a realização dos ensaios.

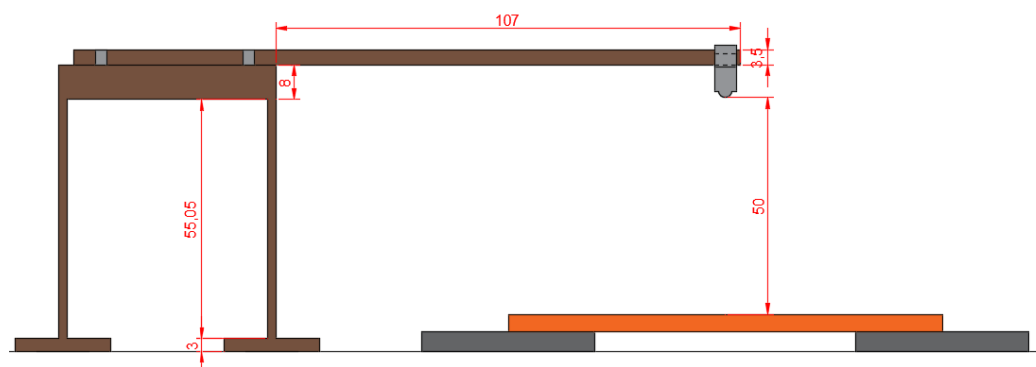


Fig. 36 – Esquema da estrutura de suporte do piranómetro (medidas em cm)



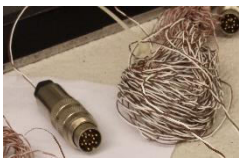
Fig. 37 – Estrutura de suporte do piranômetro

3.3.2. TERMOPARES E SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Além da medição da refletância e absortância solar das amostras serão também medidas as temperaturas superficiais das mesmas. Como se viu no subcapítulo 2.3.2, torna-se assim necessário para estas medições utilizar equipamentos normalizados. Como tal, optou-se pela utilização de termômetros de contacto elétricos, ou seja, os termopares (baseiam-se no princípio da termoeletricidade). Como se viu no subcapítulo 2.3.3, os termopares são constituídos por um par de condutores ou semicondutores diferentes ligados entre si em duas junções (sendo a superfície das amostras a junta quente e a extremidade que liga ao sistema de aquisição de dados a junta fria). Quando essas juntas se encontram a diferentes temperaturas produzem a sua própria força eletromotriz (função do gradiente de temperatura entre essas junções).

Foram escolhidos dois tipos de termopares: os termopares Tipo T e os termopares Tipo K. Os termopares **Tipo T** utilizam uma combinação de metais já normalizada, sendo o elemento positivo o **cobre** (100% Cu) e o negativo uma **liga de constantan** (55% Cu e 45% Ni). No Quadro 23 apresentam-se as especificações deste tipo de termopares.

Quadro 23 – Especificações dos termopares Tipo T

Termopar	Intervalo de temperaturas (°C)	Tolerância*	Fotografia
Tipo T	-184 a 0	$\pm 1,0\text{ °C}$ ou $\pm 1,5\%^{**}$	
	0 a 370	$\pm 1,0\text{ °C}$ ou $\pm 0,75\%^{**}$	

Fonte: ASTM (2012a)

* Escolher o maior valor para cada intervalo de temperatura. Estas tolerâncias não incluem erros de sistema ou de instalação.

** Percentagem do valor da temperatura.

Para registar as medições dessas temperaturas superficiais será utilizado um datalogger da marca Technetics, designado de Mikromec Logger Multisens e modelo: MLM1624p (Fig. 38).

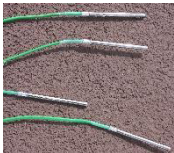


Fig. 38 – Mikromec Logger Multisens da Technetics

Este datalogger além de guardar os valores de temperatura medidos pelos termopares ao longo do tempo (guarda os valores de 10 em 10 minutos), para posterior transferência para um computador, possui ainda um pequeno ecrã com teclado que permite a consulta dos valores que estão a ser medidos. O modelo utilizado possui 16 entradas analógicas, ou seja, permite ligar até 16 termopares, sendo que a precisão da junta fria é de $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os termopares **Tipo K** também utilizam uma combinação de metais já normalizada, sendo o elemento positivo uma **liga de chromel** e o negativo uma **liga de alume**. No Quadro 24 apresentam-se as especificações deste tipo de termopares.

Quadro 24 – Especificações dos termopares Tipo K

Termopar	Intervalo de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)	Tolerância*	Fotografia
Tipo K	0 a 1260	$\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,75\%^{**}$	

Fonte: ASTM (2012a)

* Escolher o maior valor para cada intervalo de temperatura. Estas tolerâncias não incluem erros de sistema ou de instalação.

** Percentagem do valor da temperatura.

Para registar estas medições de temperaturas superficiais também será utilizado um sistema de aquisição de dados. O equipamento é da marca ONSET, designado de HOBO 4-Channel Thermocouple Data Logger (Fig. 39).

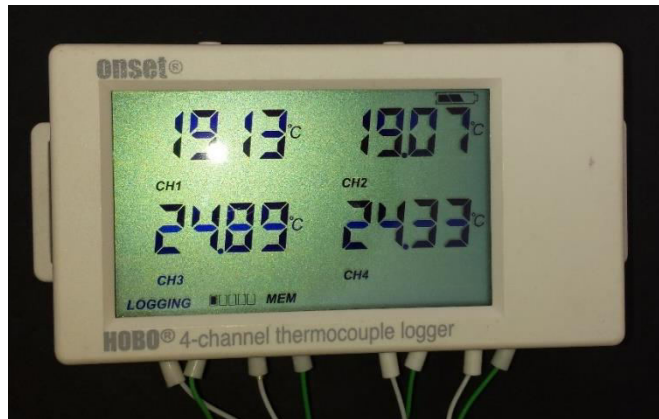


Fig. 39 – HOBO 4-Channel Thermocouple Data Logger da ONSET

Este sistema tal como o da Technetics além de guardar os valores da temperatura (tendo-se definido também um período de 10 em 10 minutos para registar esses valores) possui ainda um ecrã onde se pode consultar as temperaturas que estão a ser medidas naquele momento. Tem como vantagens as suas reduzidas dimensões e possuir uma bateria de longa duração. Este modelo possui uma memória capaz de armazenar 1,6 milhões de medições, permite a ligação de 4 termopares em simultâneo, para termopares do Tipo K apresenta uma precisão de $\pm 0,7$ °C e uma resolução de 0,04 °C.

3.3.3. ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO LFC / FEUP

Na cobertura do Departamento de Engenharia Civil (G), da FEUP, está instalada a Estação Meteorológica do LFC / FEUP. Nesta estação são realizadas medições de vários parâmetros meteorológicos que permitem caracterizar o clima do Campus da FEUP.










Fig. 40 – Estação meteorológica do LFC / FEUP (LFC, 2009) e sua localização

Na fotografia da Fig. 40 pode-se observar com contorno vermelho a localização da estação meteorológica e com contorno preto a localização do local de ensaio das amostras de ETICS e Sistema com Reboco Térmico.

A estação meteorológica do LFC / FEUP é constituída por um anemómetro (mede a velocidade e/ou força do vento), um cata-vento (mede a orientação do vento), um pluviómetro (mede a precipitação), um sensor de temperatura e humidade (mede a temperatura e humidade relativa), um pirgeómetro (sensor de radiação atmosférica e terrestre), um piranómetro com máscara de sombra (mede a radiação solar direta e difusa, sendo a soma a radiação global), um barómetro (mede a pressão atmosférica) e um sistema de aquisição dos dados registados na estação (LFC, 2009). No Quadro 25 são ainda apresentadas algumas imagens destes equipamentos que constituem a estação meteorológica.

Quadro 25 – Equipamentos da estação meteorológica

Equipamento	Imagem	Equipamento	Imagem
Anemómetro		Pirgeómetro	
Cata-vento		Piranómetro	
Pluviómetro		Barómetro	
Sensor de temperatura e humidade		Sistema de aquisição de dados	

Fonte: (LFC, 2009)

Os dados das medições da estação são guardados numa base de dados e disponibilizados para qualquer utilizador a cada 10 minutos na página da internet: <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/> (Fig. 41).

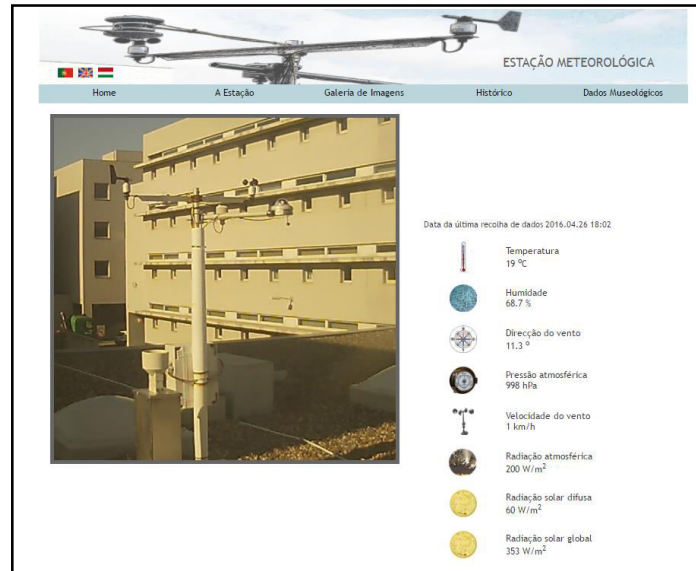


Fig. 41 – Exemplo da informação apresentada aos utilizadores na página da internet (LFC, 2009)

Como a parte experimental desta dissertação consiste na medição da radiação solar e da temperatura das amostras no exterior, então torna-se interessante conhecer as condições ambientais no momento da realização dessas medições.

4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES “*IN SITU*” DA RADIAÇÃO E REFLETÂNCIA SOLAR

As medições “*In Situ*” da radiação e refletância solar foram realizadas segundo o Método Alternativo E1918A, descrito no subcapítulo 3.1.1. Estas medições foram efetuadas nos dias 8 e 9 de Junho de 2016 entre as 10h e as 15h, sendo que neste período do dia o sol faz com a normal das superfícies a ensaiar um ângulo inferior a 45°, tal como previsto na metodologia.

Por outro lado, como se viu no subcapítulo 2.2.5, este método também só deve ser aplicado em dias ensolarados, sem nuvens ou neblina. De facto, no dia 8 de Junho de 2016 verificaram-se todas estas condições tornando-se fácil a realização das medições. No entanto, no dia 9 de Junho de 2016 verificou-se um dia ensolarado com algumas nuvens o que dificultou um pouco estas medições, uma vez que, os valores da radiação solar e refletida demoravam mais tempo a estabilizar com a passagem das nuvens.

No Quadro 26 são apresentados os valores medidos em cada amostra da refletância solar e respetiva absorptância solar (calculada por $\alpha = 1 - \rho$). Em anexo são ainda apresentadas as fichas de ensaio experimental com todos os valores medidos “*In Situ*”. De facto, os valores da refletância solar apresentados no quadro seguinte são resultado de uma média de 3 medições efetuadas para cada amostra, sendo que, em cada medição foi ainda registado um conjunto de valores intermédios (I_H , I_1 , I_2 , I_3 e I'_H). O valor adotado para a refletância solar da máscara branca opaca foi de 90% e para a máscara preta opaca de 10%.

Quadro 26 – Valores da Refletância e Absortância Solar das Amostras

Amostras	Refletância Solar (ρ)	Absortância Solar (α)
Branco [0919]	0,73	0,27
Pastel [0839]	0,66	0,34
Azul [1774]	0,56	0,44
Verde [1436]	0,41	0,59
Tijolo [0555]	0,36	0,64
Vermelho [0444 - “cool pigments”]	0,34	0,66
Vermelho [0444]	0,31	0,69
Preto [3500-ETICS - “cool pigments”]	0,27	0,73

Amostras	Refletância Solar (ρ)	Absortância Solar (α)
Preto [3500-Reboco Térmico - "cool pigments"]	0,27	0,73
Wengué [0412]	0,23	0,77
Castanho [0426]	0,22	0,78
Preto [3500-ETICS]	0,12	0,88
Preto [3500-Reboco Térmico]	0,12	0,88

No gráfico da Fig. 42 é ainda apresentada uma comparação entre os valores da absortância solar medidos e os nominais, para os revestimentos das amostras.

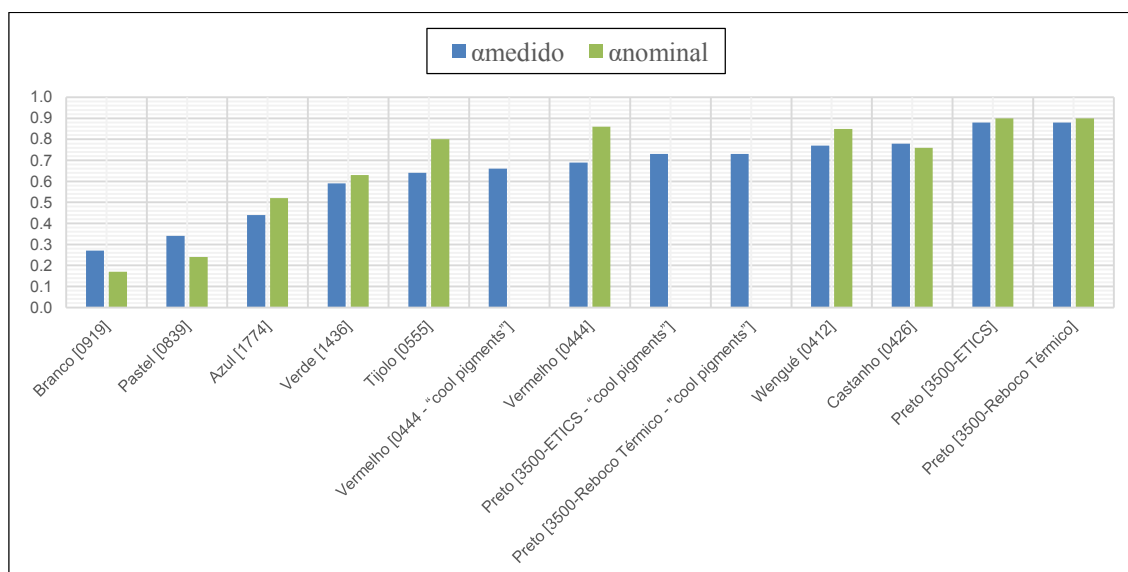


Fig. 42 – Comparação entre os valores de absortância solar

4.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA TEMPERATURA SUPERFICIAL

4.2.1. PRIMEIRO ENSAIO EM CÂMARA CLIMÁTICA

Como foi referido no subcapítulo 3.1.2, antes de se iniciarem as medições “*In Situ*” da temperatura superficial das amostras instalaram-se todos os termopares, Tipo T e Tipo K, numa Câmara Climática a temperatura constante ($T = 23^\circ$). O principal objetivo desta etapa é avaliar se todos os termopares funcionam corretamente e quais as variações entre os valores de temperatura medidos, sendo que estes devem dar próximos da temperatura da Câmara Climática. Estas medições foram realizadas entre as 17:40 do dia 10/05/2016 e as 15:40 do dia 11/05/2016.

Como se pode observar na Fig. 43, conclui-se que os termopares Tipo T número 3 e 10 encontram-se danificados, sendo necessária a sua posterior substituição.

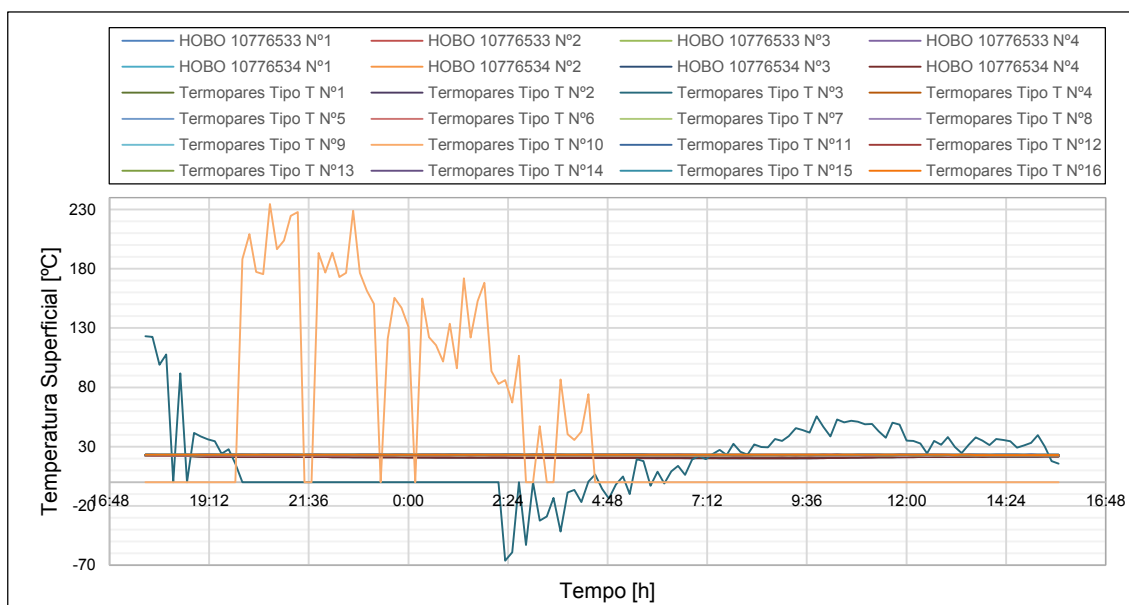


Fig. 43 – Valores da temperatura medida pelos termopares

Eliminando os valores desses termopares danificados e ajustando o gráfico obtém-se:

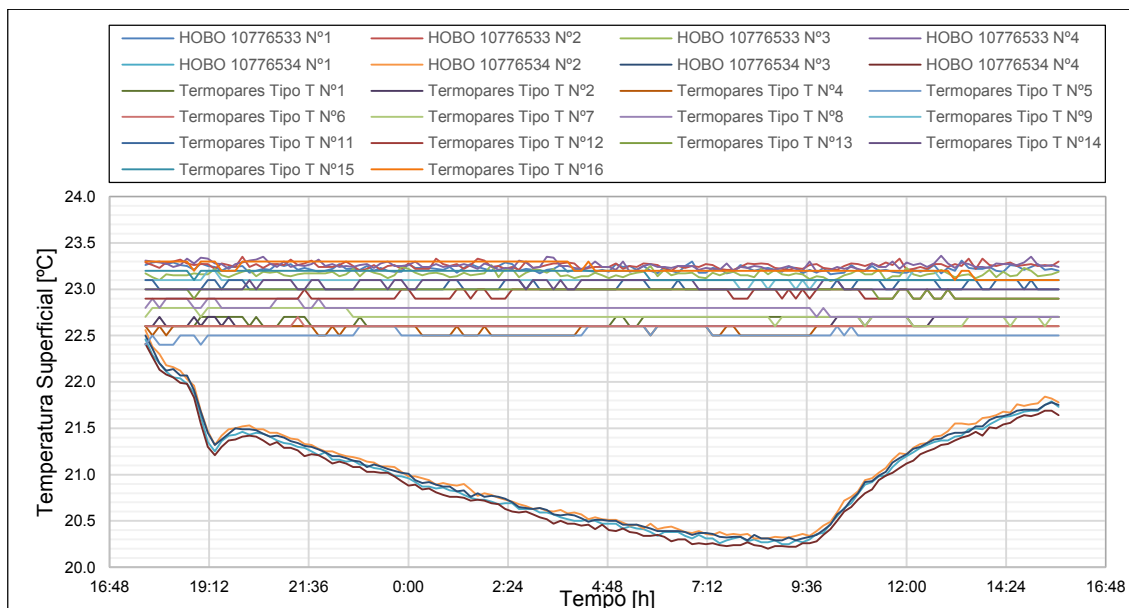


Fig. 44 – Valores da temperatura medida pelos termopares (sem os Tipo T Nº3 e Nº10)

Após análise do gráfico da Fig. 44, pode-se ainda concluir que os termopares Tipo K que estão ligados ao sistema de aquisição de dados “HOBO 10776534” não dão valores próximos dos outros termopares nem da temperatura constante da Câmara Climática. Como tal, devido ao seu incorreto funcionamento estes também não serão utilizados para avaliar temperaturas superficiais das amostras.

Eliminando os valores desses termopares e ajustando novamente o gráfico obtém-se:

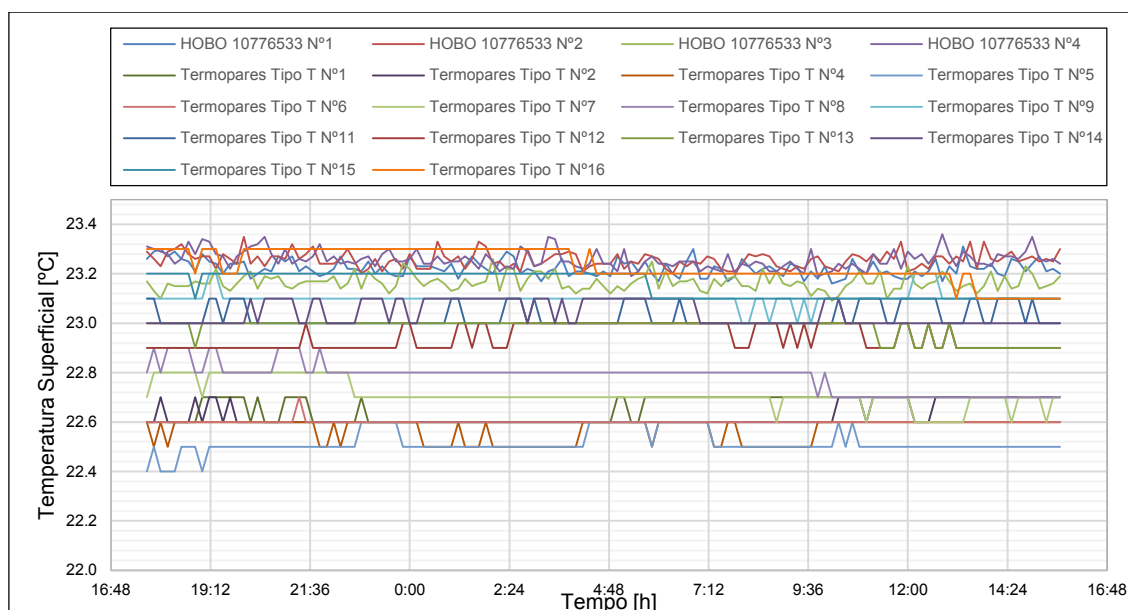


Fig. 45 – Valores da temperatura medida pelos termopares (sem os Tipo T N°3 e N°10 e sem os Tipo K que estão ligados ao “HOB0 10776534”)

Analisando o gráfico da Fig. 45 pode-se concluir que os termopares Tipo K e os termopares Tipo T do número 9 ao 16 dão próximos dos 23 °C. No entanto, os termopares Tipo T do número 1 ao 8 dão ligeiramente abaixo. Julga-se que este erro está associado ao próprio sistema de aquisição de dados, uma vez que, as 16 entradas analógicas do sistema estão divididas em duas filas de 8 e os termopares que medem os valores inferiores estão todos na mesma fila. Assim sendo, vai-se adicionar um fator de correção aos valores medidos por estes termopares (pois os restantes dão todos próximos da temperatura da Câmara Climática).

Para determinar esse fator de correção começa-se por determinar a média dos valores da temperatura medidos por cada um dos termopares:

Quadro 27 – Média das temperaturas medidas pelos termopares Tipo T

	N°1	N°2	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9	N°11	N°12	N°13	N°14	N°15	N°16
Temperatura Superficial	22,7	22,6	22,6	22,5	22,6	22,7	22,8	23,1	23,0	22,9	23,0	23,0	23,2	23,2

Com base no Quadro 27, tem-se uma média de 22,6 °C para os primeiros sete termopares (correspondentes a uma fila do sistema de aquisição de dados) e uma média de 23,1 °C para os restantes termopares (correspondentes a outra fila). Assim sendo, o fator de correção a ser adicionado aos valores dos primeiros termopares será de 0,5 °C ($a = 23,1 - 22,6$).

Somando esse fator de correção aos valores da temperatura medidos pelos termopares Tipo T do N°1 ao N°8 e realizando um novo gráfico de dispersão de valores obtém-se:

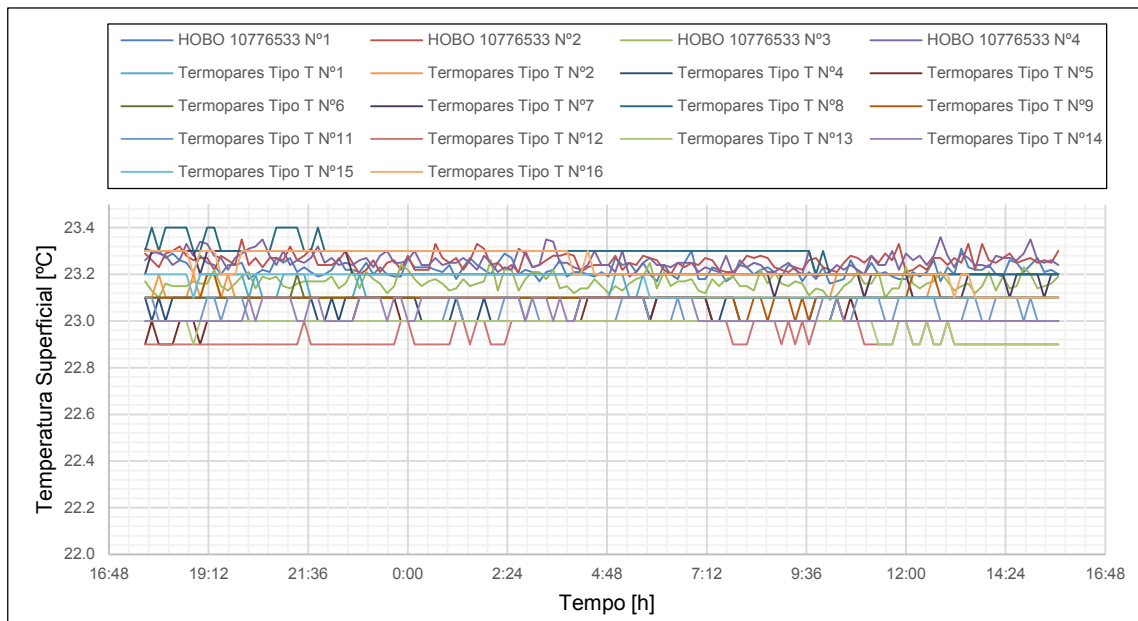


Fig. 46 – Valores da temperatura corrigidos pelo fator de correção

Como se pode observar no gráfico da Fig. 46, após a implementação desta correção os valores das temperaturas superficiais já dão todos próximos dos 23°C da Câmara Climática. Assim sendo, daqui em diante este fator de correção será sempre introduzido nos valores das medições dos termopares Tipo T N°1 ao N°8.

4.2.2. ENSAIOS “*IN SITU*” DA TEMPERATURA SUPERFICIAL

Um dos principais objetivos deste trabalho é a medição da temperatura superficial das amostras quando expostas à radiação solar. Como foi referido no subcapítulo 3.1.2, para estas medições “*In Situ*” optou-se por instalar numa primeira fase todos os termopares na mesma superfície, sendo escolhida a amostra de ETICS com revestimento de cor **vermelho (0444)**. A realização desta primeira etapa de medições tem como intuito confirmar se durante a instalação dos termopares nenhum ficou danificado, se os novos termopares do Tipo T N°3 e N°10 funcionam corretamente e avaliar as variações entre os valores de temperaturas medidos, uma vez que, as medições já não são realizadas num clima controlado.

Estas medições foram realizadas entre as 12:27 do dia 18/05/2016 até às 11:40 do dia 20/05/2016. No entanto como se pode observar na Fig. 47 existe uma paragem nas medições de temperatura com os termopares do tipo K entre as 11:07 e as 12h50 do dia 19/05/2016. Tal deve-se ao facto de estes termopares terem descolado da superfície a medir, tendo sido necessário parar as suas medições para realizar nova fixação. Na mesma figura pode-se observar que dos 16 termopares do Tipo T instalados apenas aparecem as medições de 15 pois um deles (o N°2) ficou danificado durante a instalação.

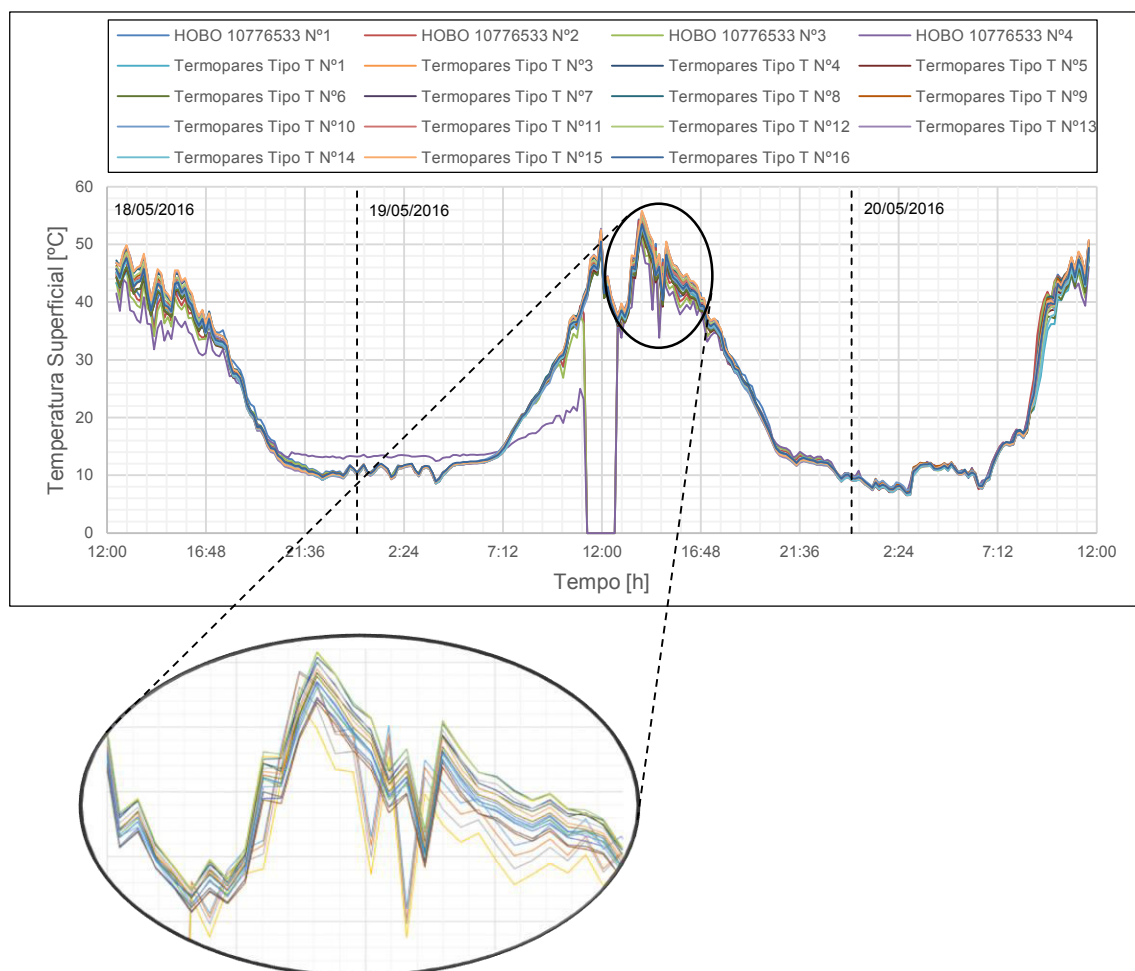


Fig. 47 – Valores da temperatura superficial (sem valores da “HOBO 10776534”)

Os 4 termopares do Tipo K, após correta colagem à superfície, já apresentam valores mais próximos dos termopares de Tipo T. No entanto analisando mais detalhadamente o zoom do gráfico (zona das temperaturas mais altas) pode-se confirmar que num clima não controlado estes termopares continuam a apresentar algumas variações significativas em relação aos do Tipo T. Assim sendo, vai-se optar por utilizar apenas os 15 termopares do Tipo T para medir as temperaturas superficiais das amostras.

Como se referiu no subcapítulo 3.1.2 nesta segunda fase de medições “*In Situ*” vai-se então medir as temperaturas superficiais das 13 amostras. No entanto, estamos longe da situação ideal referida nesse subcapítulo, onde se possuiriam 16 termopares do Tipo T e 8 do Tipo K para medirem as temperaturas. De facto, só se tem disponíveis 15 termopares do Tipo T e os do Tipo K não se tornaram viáveis para serem utilizados.

Com base nos termopares disponíveis vai-se dividir pelas seguintes etapas as medições das temperaturas superficiais:

- **1º Etapa** - Amostras: 3500 [Preto - ETICS], 3500 [Preto - Reboco Térmico], 3500 [Preto - ETICS - “cool pigments”], 3500 [Preto - Reboco Térmico - “cool pigments”], 0444 [Vermelho], 0412 [Wengué] e 0919 [Branco];
- **2º Etapa** - Amostras: 3500 [Preto - ETICS], 0919 [Branco], 0444 [Vermelho], 0412 [Wengué], 0426 [Castanho], 0444 [Vermelho - “cool pigments”] e 0555 [Tijolo];

- **3º Etapa** - Amostras: 3500 [Preto - ETICS], 0919 [Branco], 0444 [Vermelho], 0412 [Wengué], 0839 [Pastel], 1774 [Azul] e 1436 [Verde];

Assim sendo, em todas as etapas vão-se utilizar 4 amostras comuns em cada medição, uma vez que, estas serão realizadas em períodos e condições atmosféricas diferentes permitindo assim comparação entre os valores. Escolheu-se para amostras de referência o 3500 [Preto - ETICS] e 0919 [Branco] porque são as que se esperam medir as maiores e menores temperaturas, respetivamente. Já as amostras 0444 [Vermelho] e 0412 [Wengué] tiveram também de ser mantidas porque dos 15 termopares 5 deles tinha comprimentos de cabo bastante reduzidos chegando apenas a estas amostras.

A **1ª Etapa** de medições das amostras iniciou-se a 20/05/2016 às 17h10 e terminou a 30/05/2016 às 10h20. Seguidamente apresenta-se um gráfico com as temperaturas superficiais registadas pelos termopares nas sete amostras e a temperatura ambiente, dada pela estação meteorológica do LFC/FEUP.

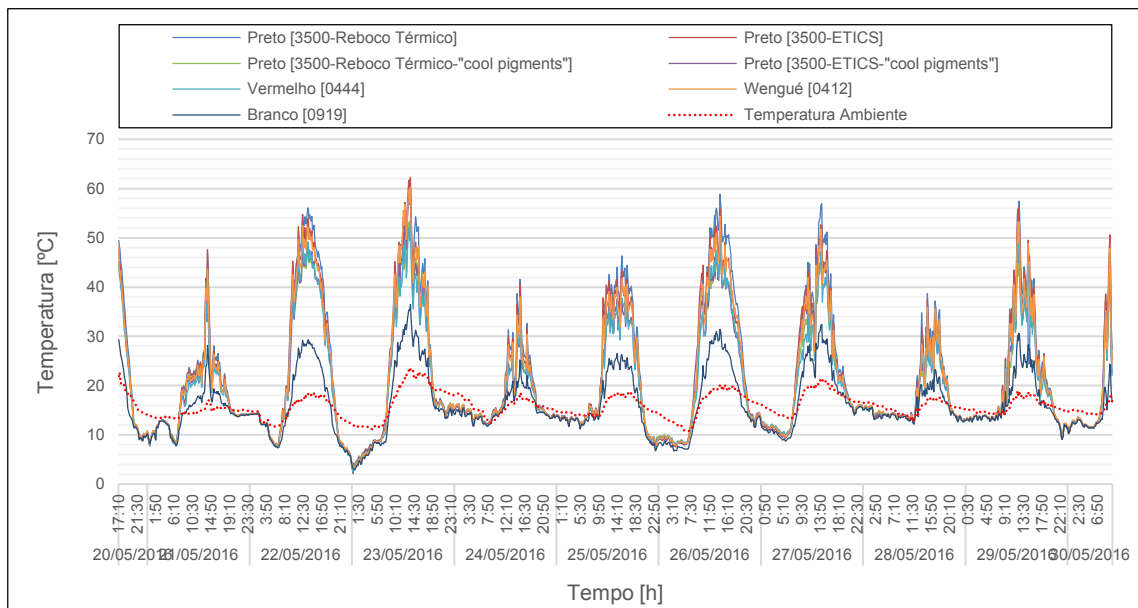


Fig. 48 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente do dia 20 a 30 de Maio de 2016

Tendo por base a análise do gráfico da Fig. 48 conclui-se que os dois dias consecutivos, no período em análise, com temperaturas mais elevadas foram os dias 22 e 23 de Maio de 2016. Para uma análise mais pormenorizada desses dois dias apresenta-se seguidamente um novo gráfico:

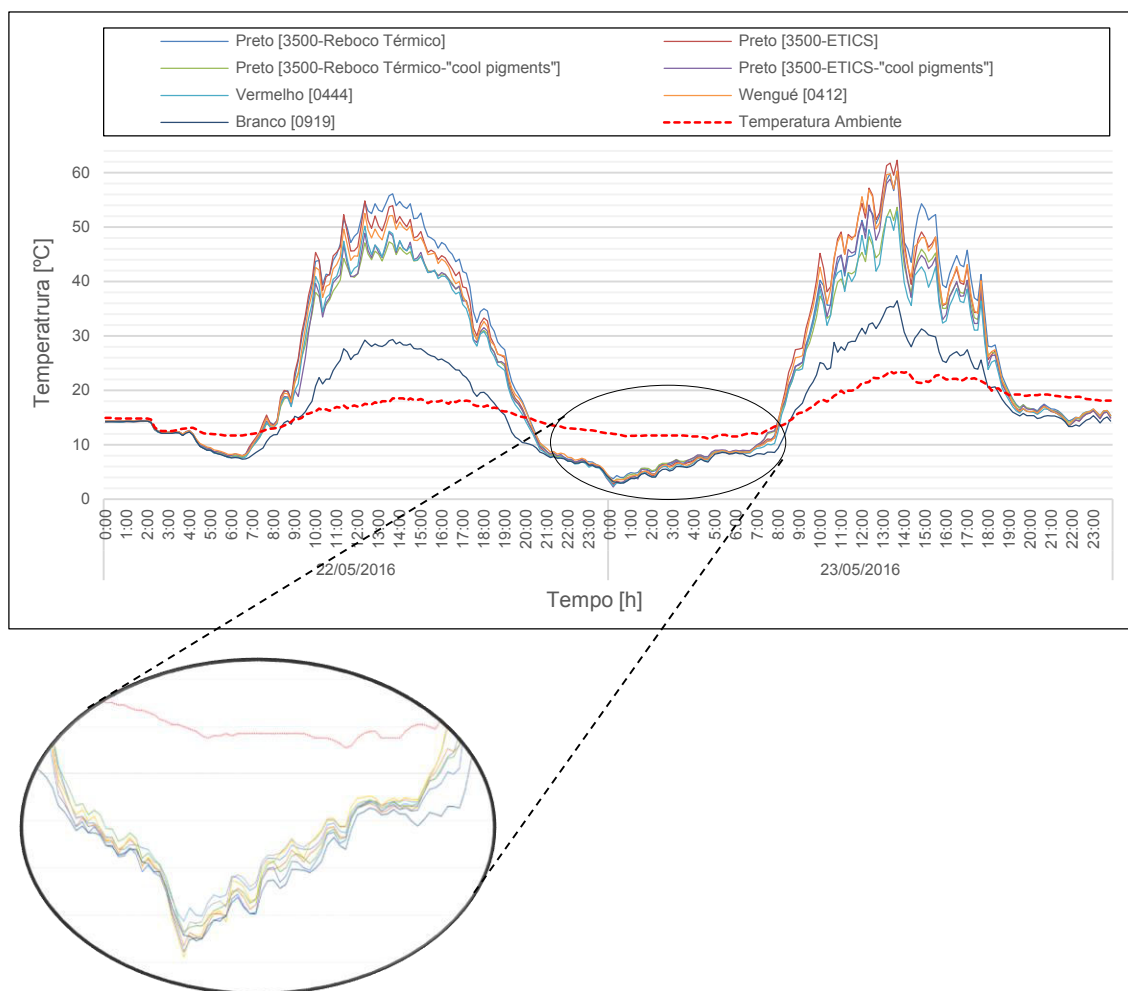


Fig. 49 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente dos dias 22 e 23 de Maio de 2016

Da análise do gráfico da Fig. 49 constata-se que durante o dia as temperaturas superficiais das amostras são superiores à temperatura ambiente. Sendo que a amostra branca [0919] dá temperaturas superficiais bastante inferiores às das restantes amostras. Como seria de esperar os revestimentos de cor preta [3500 - Reboco Térmico] e [3500 - ETICS] são os que atingem maiores temperaturas. No entanto, os revestimentos de cor preta [3500 - Reboco Térmico - “cool pigments”] e [3500 - ETICS - “cool pigments”], graças aos pigmentos que aumentam a sua refletância, conseguem atingir temperaturas superficiais menores que o vermelho [0444] e o Wengué [0412]. De facto, com o aumento da refletância desses revestimentos tem-se uma redução no calor absorvido por essa camada final, o que se traduz numa redução da sua temperatura superficial. Por outro lado, durante a noite as temperaturas superficiais das amostras são bastante próximas entre si e inferiores à temperatura ambiente.

Tal como anteriormente foi referido, as medições das temperaturas superficiais foram divididas por etapas nas quais se adotou algumas amostras como referência. Estas amostras comuns nas 3 etapas de medição vão possibilitar a comparação entre os valores registados. Para essa comparação de valores vai-se recorrer a gráficos de frequência acumulada, cujo o eixo das abcissas se rege pelos valores resultantes das expressões (22) e (23).

$$T_1 = T_{Amostra} - T_{Branco} [0919] [^{\circ}\text{C}] \quad (22)$$

Escolheu-se o indicador T_1 , na qual se adotou como termo de comparação a amostra com revestimento Branco [0919], uma vez que, espera-se que seja a que atinja as menores temperaturas superficiais. Vai-se assim obter os valores que excedem a temperatura dessa amostra de referência. A título de exemplo, numa nova etapa de medições em que as amostras sejam expostas a maior radiação solar (atingindo maiores temperaturas superficiais) também a amostra de referência vai ser exposta a essas mesmas condições. Como tal, a diferença entre a amostra a medir e a de referência poderá ser, de forma simplificada, comparada com os valores das outras medições e etapas. Seguidamente apresenta-se o Gráfico de Frequência Acumulada tendo por base essa expressão.

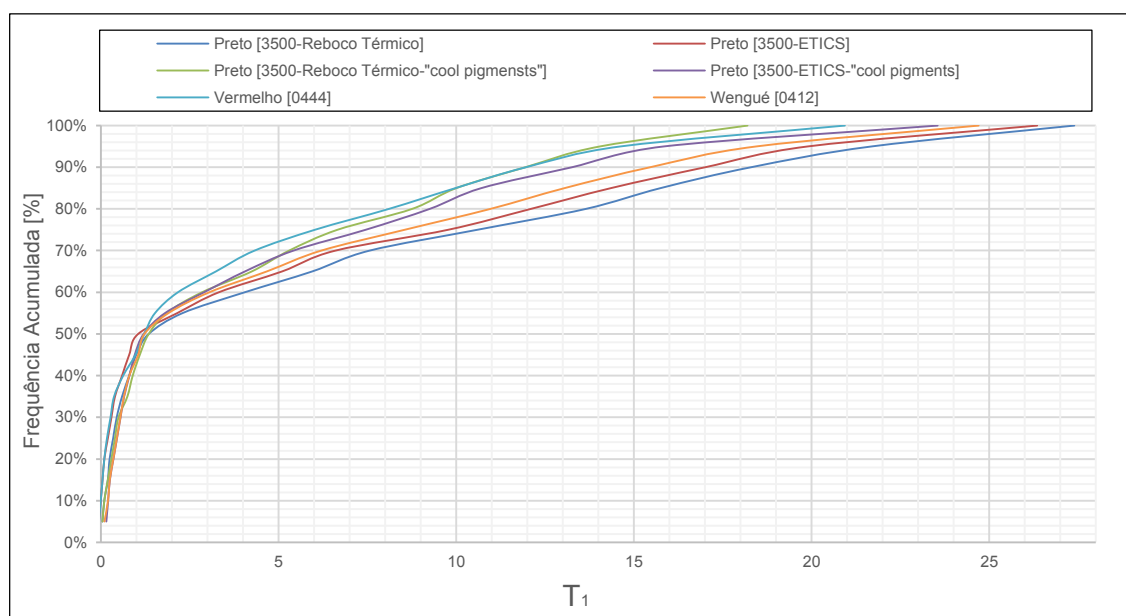


Fig. 50 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_1 (1ª Etapa)

Por análise do gráfico da Fig. 50, obtém-se os seguintes valores para o percentil 95%:

Quadro 28 – Valores das Temperaturas [$^{\circ}\text{C}$] para o percentil 95% de T_1 (1ª Etapa)

	Preto [3500-Reboco Térmico]	Preto [3500- ETICS]	Preto [3500-Reboco Térmico - "cool pigments"]	Preto [3500-ETICS - "cool pigments"]	Vermelho [0444]	Wengué [0412]
$T_{1,95\%}$	21,70	19,90	14,05	15,85	14,63	18,45

$$T_2 = \frac{T_{Amostra} - T_{Branco} [0919]}{T_{Preto [3500-ETICS]} - T_{Branco} [0919]} \quad (23)$$

Para esta análise de resultados também se utilizou o indicador T_2 . Porém, neste caso adotou-se como termos de comparação duas amostras: o Branco [0919] e o preto [3500 - ETICS], uma vez que, inicialmente esperava-se que fossem as amostras que atingissem as menores e maiores temperaturas superficiais, respetivamente.

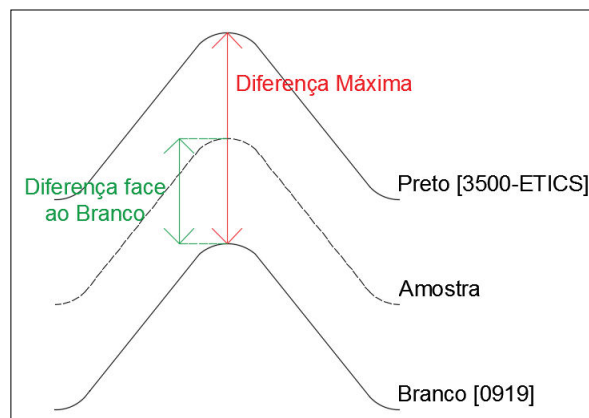


Fig. 51 – Esquema de interpretação do indicador T_2

Como se pode observar na Fig. 51 os valores obtidos pelo indicador T_2 resultam assim de uma comparação entre a diferença de temperatura da amostra e do Branco [0919] com a diferença máxima de temperaturas. Outra diferença em relação à análise anteriormente realizada está no facto de se avaliar apenas os valores das medições no período diurno (8h00 às 20h00). Tal deve-se ao facto de no período noturno os valores da temperatura das várias amostras darem próximos entre si, o que originaria situações em que a expressão apareceria a dividir por zero. Esta alternativa é também aceitável, uma vez que, o principal objetivo é avaliar o comportamento desses revestimentos quando expostos à radiação solar.

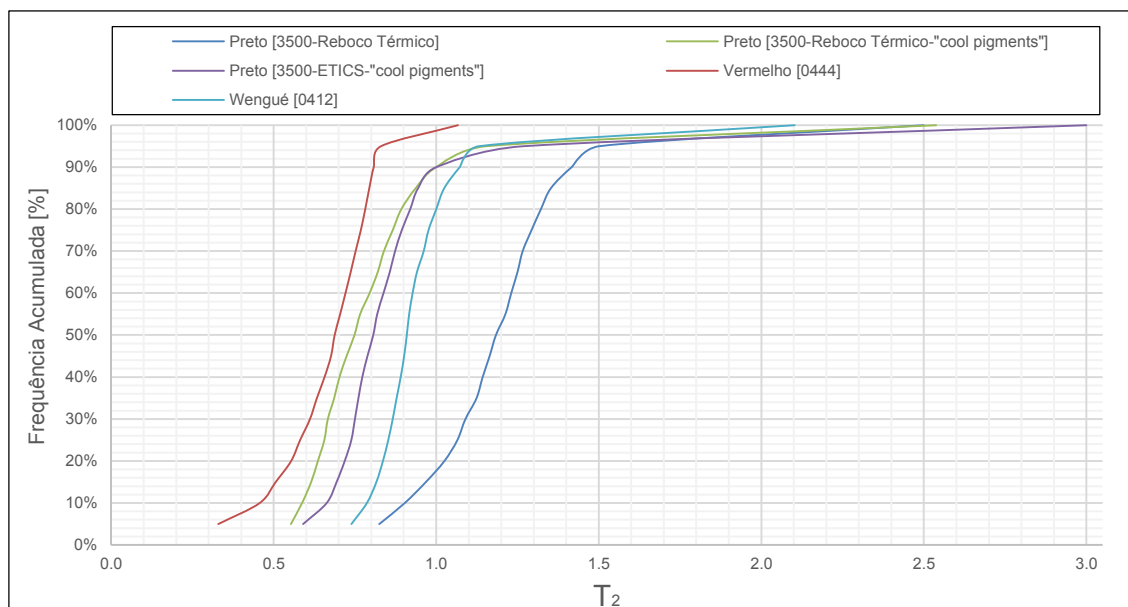


Fig. 52 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_2 (1ª Etapa)

Por análise do gráfico da Fig. 52, obtém-se os seguintes valores para o percentil 50%:

Quadro 29 – Valores do Indicador T_2 para o percentil 50% (1ª Etapa)

	Preto [3500-Reboco Térmico]	Preto [3500-Reboco Térmico - “cool pigments”]	Preto [3500-ETICS - “cool pigments”]	Vermelho [0444]	Wengué [0412]
$T_{2,50\%}$	1,18	0,75	0,81	0,69	0,91

Com base no Quadro 29 observa-se que o valor do indicador T_2 , para o percentil 50%, do revestimento Preto [3500-Reboco Térmico] dá superior a unidade. Concluindo-se assim, que este revestimento atinge maiores temperaturas superficiais que o Preto [3500-ETICS].

A **2ª Etapa** de medições das amostras iniciou-se a 31/05/2016 às 10h00 e terminou a 06/06/2016 às 10h00. Seguidamente apresenta-se o gráfico com as temperaturas superficiais registadas pelos termopares nestas amostras e a temperatura ambiente, fornecida pela estação meteorológica do LFC / FEUP.

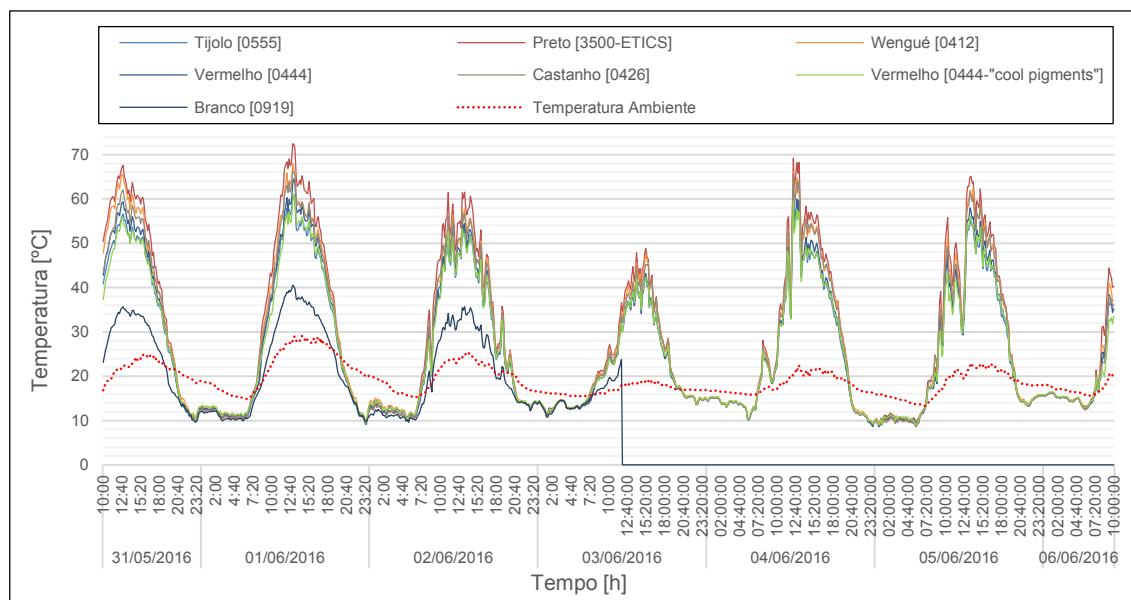


Fig. 53 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente do dia 31 de Maio a 6 de Junho de 2016

Com base no gráfico da Fig. 53 conclui-se que os termopares instalados na amostra branca [0919] a partir das 12h00 do dia 3 de Junho de 2016 deixaram de registar as temperaturas superficiais. Após inspeção dos termopares e respetivas fixações à amostra confirmou-se que os fios na junta quente se tinham separado (sendo reparados e fixados para a realização da última etapa de medições).

No entanto, como as temperaturas desta amostra são utilizadas como referência para comparação entre etapas vai-se então utilizar os valores registados enquanto os termopares funcionavam corretamente, ou seja, entre as 10h00 do dia 31/05/2016 e as 11h50 do dia 03/06/2016. A adoção destes valores é também aceitável, uma vez que, corresponde ao período consecutivo onde se registaram as maiores temperaturas.

Apresenta-se seguidamente o gráfico desses dias:

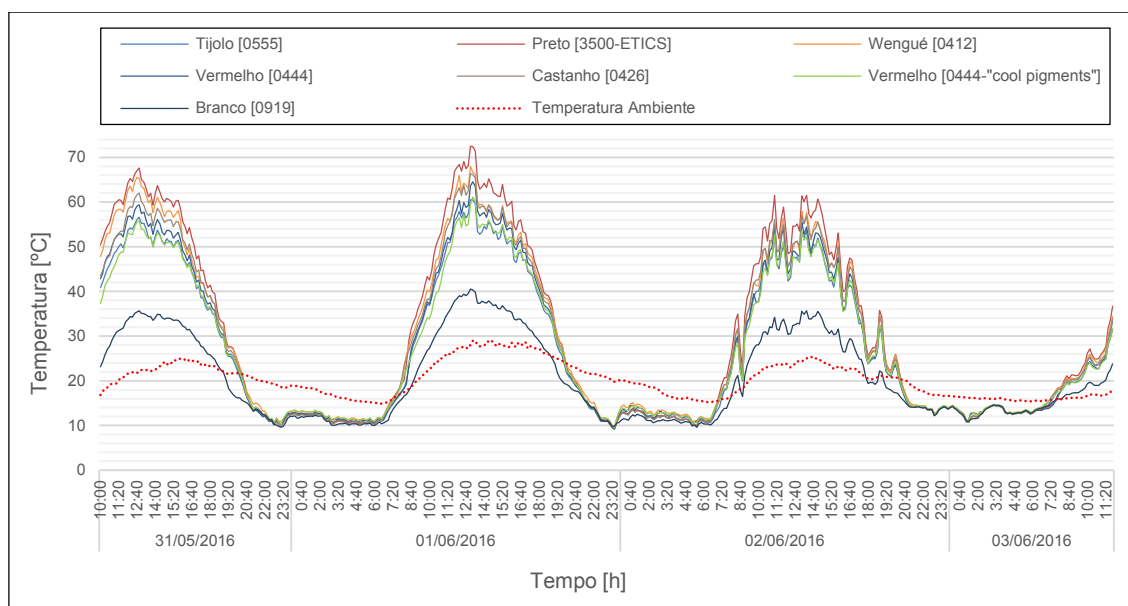


Fig. 54 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente entre as 10h00 do dia 31/05/2016 e as 11h50 do dia 03/06/2016

Após a análise do gráfico da Fig. 54, constata-se mais uma vez que durante o dia as temperaturas superficiais das amostras são superiores à temperatura ambiente e durante a noite essas temperaturas são bastante próximas entre si e inferiores a temperatura ambiente. A amostra branca [0919] continua a ser aquela onde se registam as temperaturas superficiais mais baixas.

Seguidamente apresentam-se também os Gráficos de Frequência Acumulada e respetivos quadros, tendo por base os indicadores T_1 (Fig. 55 e Quadro 30) e T_2 (Fig. 56 e Quadro 31), para esta nova etapa de medições:

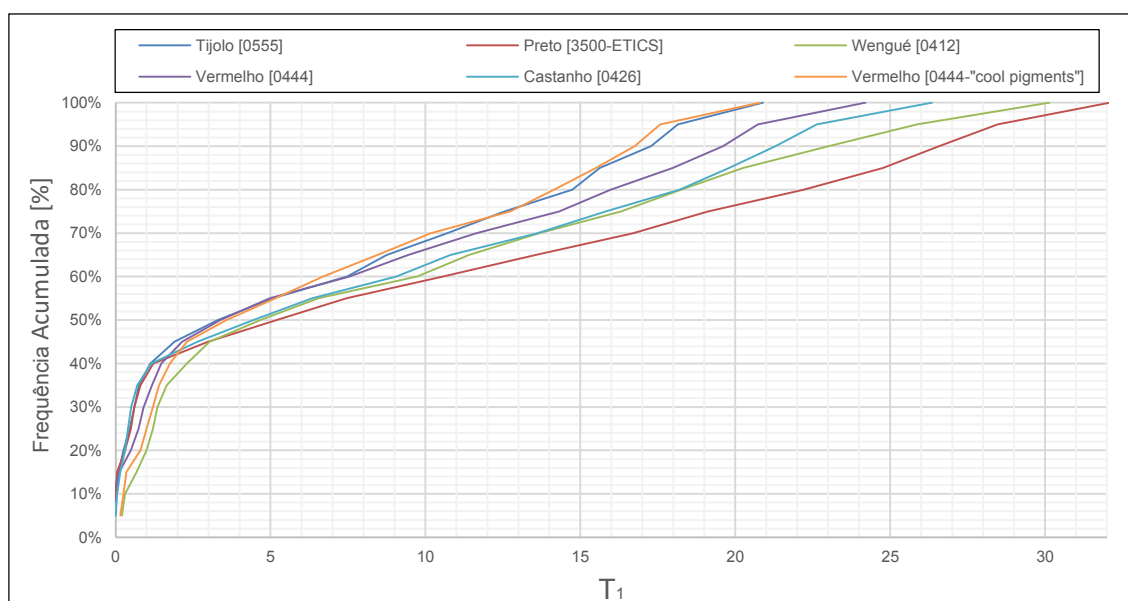
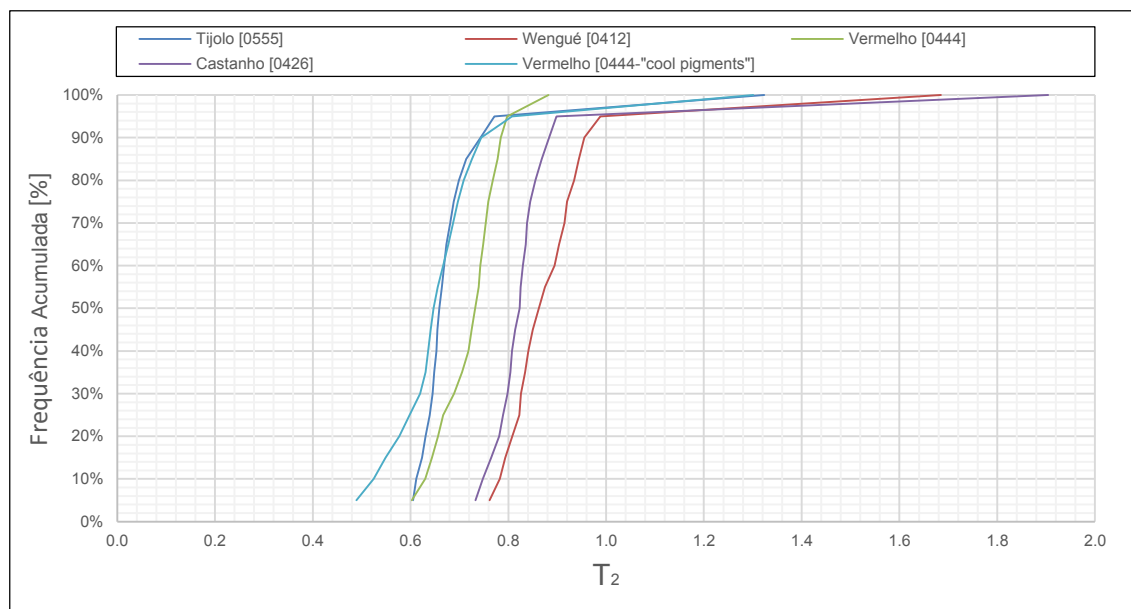


Fig. 55 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_1 (2ª Etapa)

Quadro 30 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95% de T_1 (2ª Etapa)

	Tijolo [0555]	Preto [3500-ETICS]	Wengué [0412]	Vermelho [0444]	Castanho [0426]	Vermelho [0444 - “cool pigments”]
$T_{1,95\%}$	18,15	28,47	25,87	20,73	22,64	17,58

Fig. 56 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_2 (2ª Etapa)Quadro 31 – Valores do indicador T_2 para o percentil 50% (2ª Etapa)

	Tijolo [0555]	Wengué [0412]	Vermelho [0444]	Castanho [0426]	Vermelho [0444 - “cool pigments”]
$T_{2,50\%}$	0,66	0,86	0,73	0,82	0,65

A **3ª Etapa** de medições das amostras iniciou-se a 07/06/2016 às 12h20 e terminou a 09/06/2016 às 23h50. Seguidamente apresenta-se o gráfico (Fig. 57) com as temperaturas superficiais registadas pelos termopares nestas amostras e a temperatura ambiente, fornecida pela estação meteorológica do LFC / FEUP.

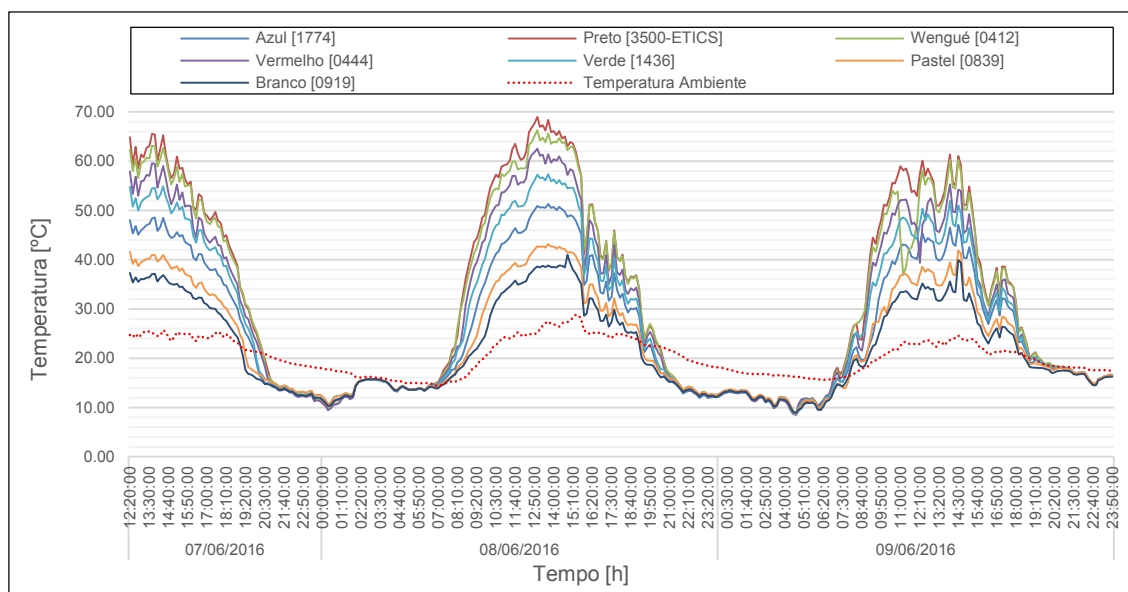


Fig. 57 – Valores da temperatura superficial das amostras e temperatura ambiente do dia 7 a 9 de Junho de 2016

Seguidamente apresentam-se também os Gráficos de Frequência Acumulada e respetivos quadros, tendo por base os indicadores T_1 (Fig. 58 e Quadro 32) e T_2 (Fig. 59 e Quadro 33), para esta última etapa de medições:

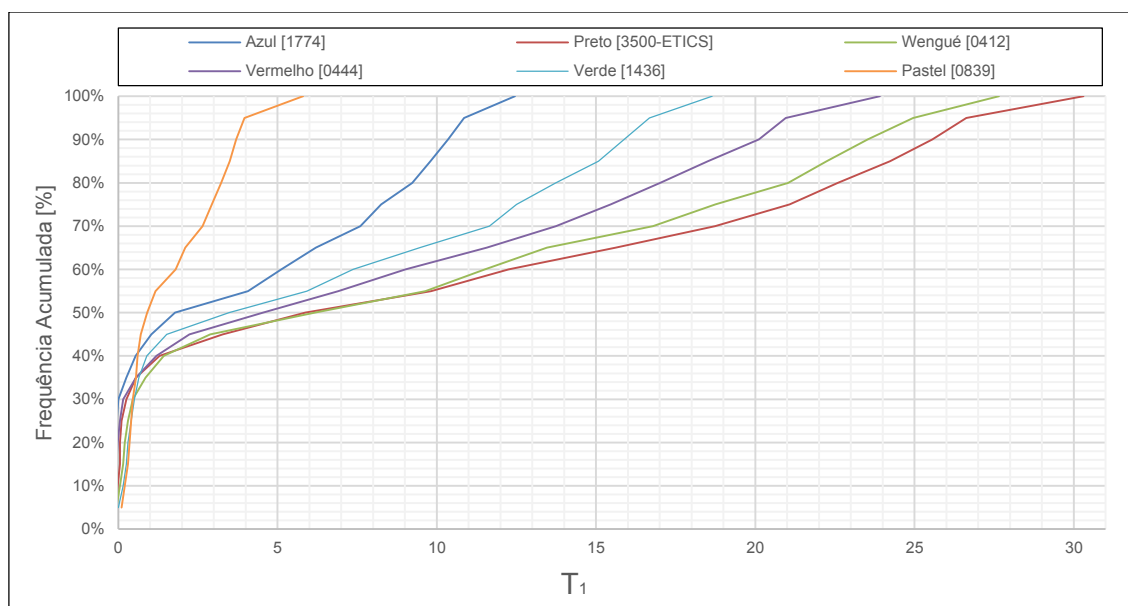
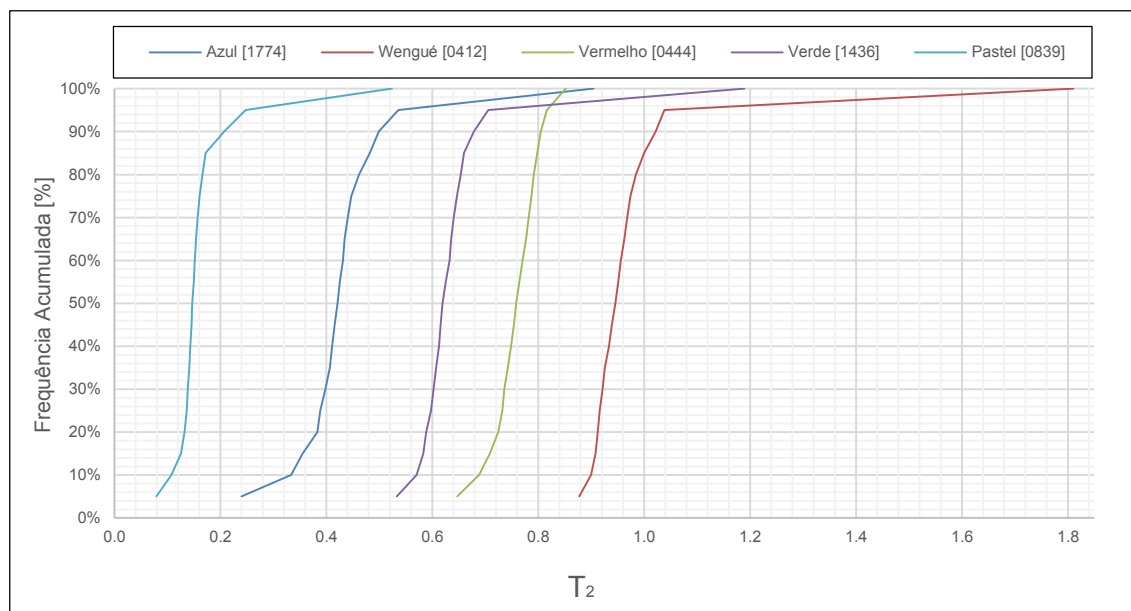


Fig. 58 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_1 (3ª Etapa)

Quadro 32 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95% de T_1 (3ª Etapa)

	Azul [1774]	Preto [3500-ETICS]	Wengué [0412]	Vermelho [0444]	Verde [1436]	Pastel [0839]
$T_{1,95\%}$	10,86	26,63	24,96	20,96	16,68	3,96

Fig. 59 – Frequência acumulada tendo por base o indicador T_2 (3ª Etapa)Quadro 33 – Valores do indicador T_2 para o percentil 50% (3ª Etapa)

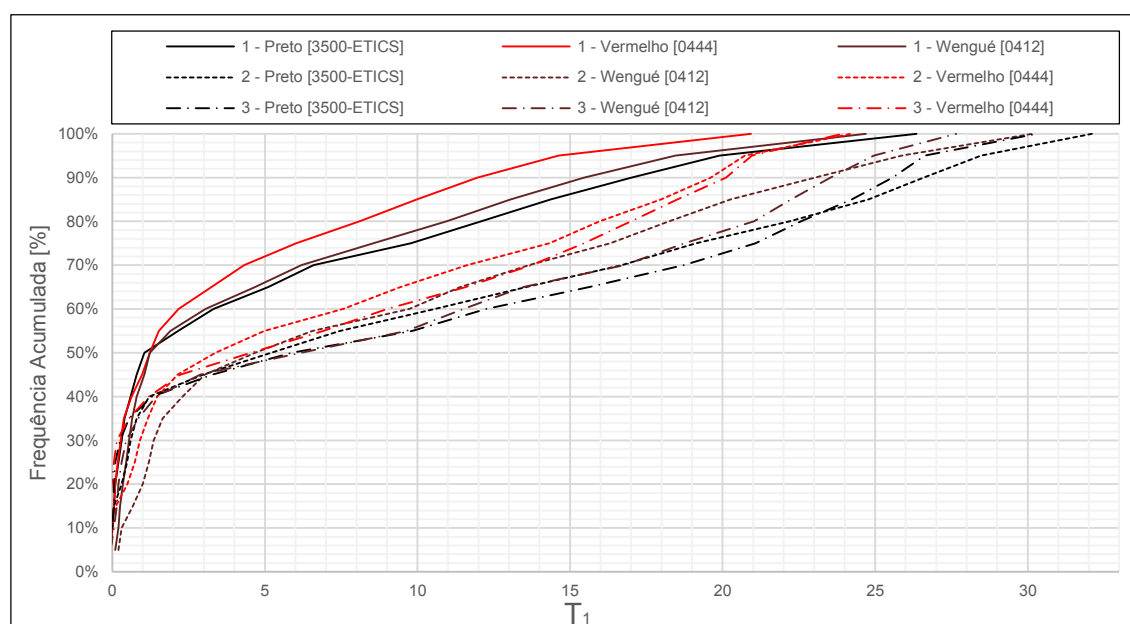
	Azul [1774]	Wengué [0412]	Vermelho [0444]	Verde [1436]	Pastel [0839]
$T_{2,50\%}$	0,42	0,95	0,76	0,62	0,15

Concluídas as três etapas de medições compilou-se nos quadros seguintes, Quadro 34 e Quadro 35, e nas figuras seguintes, Fig. 60 e Fig. 61, os valores obtidos pelos indicadores T_1 e T_2 . Possibilitando-se assim avaliar a robustez destes indicadores quando se utilizam os seus valores para efetuar comparações entre amostras medidas em etapas diferentes, tendo por base as amostras de referência.

Quadro 34 – Valores das Temperaturas [°C] para o percentil 95%

$T_{1,95\%}$	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Preto [3500-Reboco Térmico]	21,70	-	-
Preto [3500-ETICS]	19,90	28,47	26,63
Preto [3500-Reboco Térmico - “cool pigments”]	14,05	-	-
Preto [3500-ETICS - “cool pigments”]	15,85	-	-

$T_{1,95\%}$	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Vermelho [0444]	14,63	20,73	20,96
Wengué [0412]	18,45	25,87	24,96
Tijolo [0555]	-	18,15	-
Castanho [0426]	-	22,64	-
Vermelho [0444 - “cool pigments”]	-	17,58	-
Azul [1774]	-	-	10,86
Verde [1436]	-	-	16,68
Pastel [0839]	-	-	3,96

Fig. 60 – Frequência acumulada das amostras de referência tendo por base o indicador T_1

Neste indicador T_1 verifica-se uma diferença significativa entre os valores, das amostras de referência, da 1ª Etapa de medições e os valores das restantes etapas.

Quadro 35 – Valores do indicador T_2 para o percentil 50%

$T_{2,50\%}$	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Preto [3500-Reboco Térmico]	1,18	-	-
Preto [3500-Reboco Térmico - “cool pigments”]	0,75	-	-
Preto [3500-ETICS - “cool pigments”]	0,81	-	-
Vermelho [0444]	0,69	0,73	0,76
Wengué [0412]	0,91	0,86	0,95

$T_{2,50\%}$	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Tijolo [0555]	-	0,66	-
Castanho [0426]	-	0,82	-
Vermelho [0444 - “cool pigments”]	-	0,65	-
Azul [1774]	-	-	0,42
Verde [1436]	-	-	0,62
Pastel [0839]	-	-	0,15

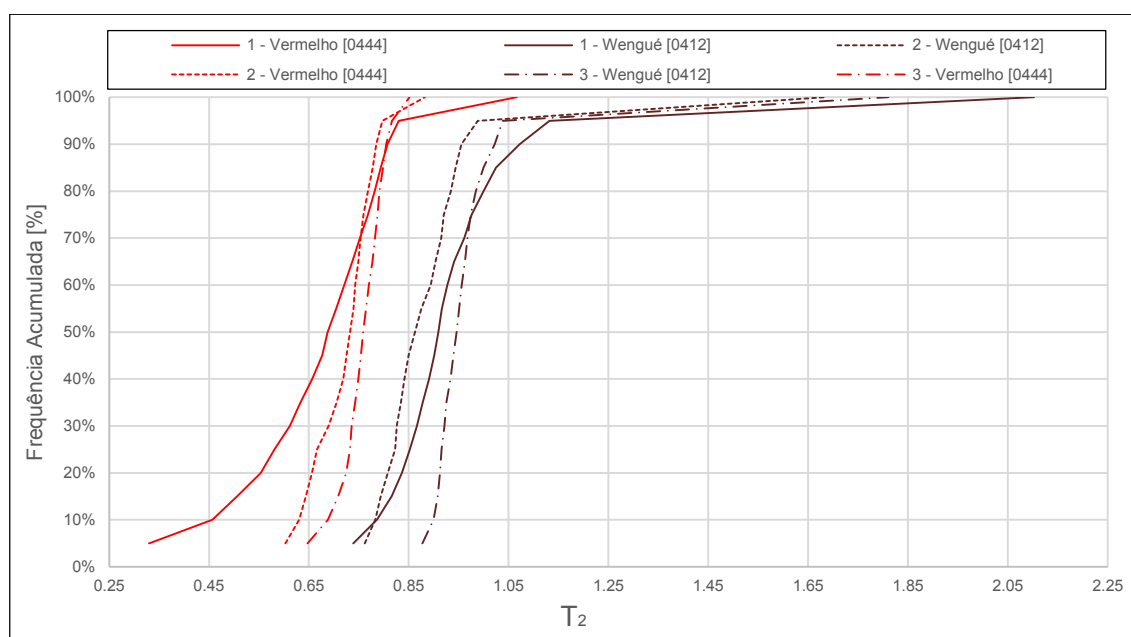


Fig. 61 – Frequência acumulada das amostras de referência tendo por base o indicador T_2

Neste indicador T_2 os valores das três etapas já deram mais próximos para as amostras de referência. Tornando-se assim este o indicador mais aconselhável para comparar amostras medidas em etapas diferentes.

Assim sendo, os ensaios experimentais “in situ” do presente trabalho foram todos realizados entre o dia 20 de Maio 2016 e o dia 9 de Junho de 2016. Para uma melhor compreensão das condições climáticas destes dias apresenta-se o gráfico da Fig. 62 e o Quadro 36. Neste gráfico apresenta-se a variação da temperatura ambiente e da radiação solar global ao longo do período experimental.

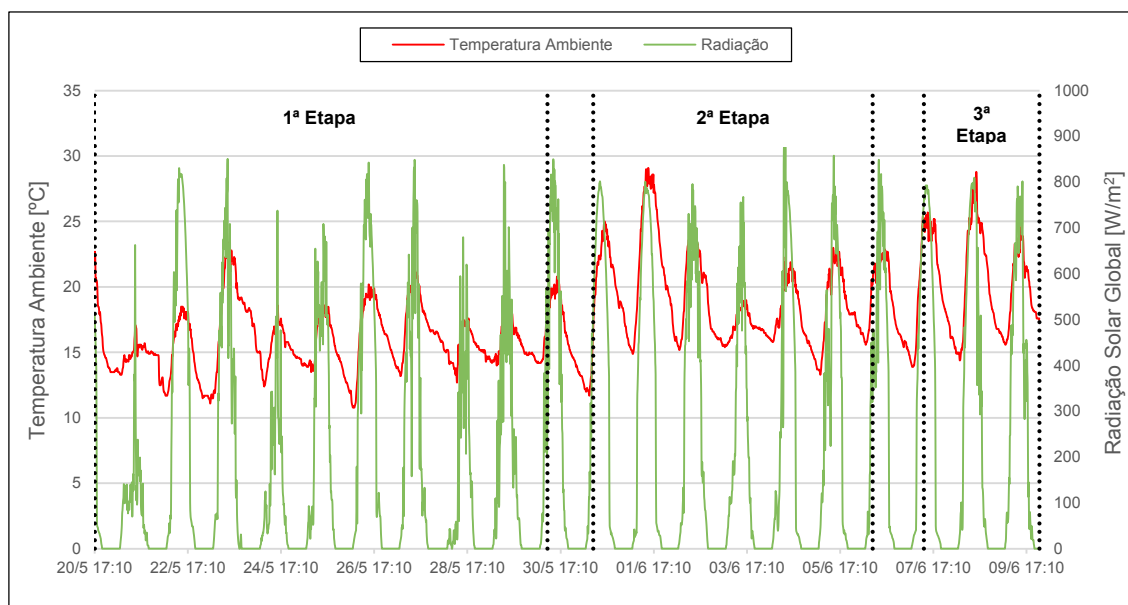


Fig. 62 – Temperatura Ambiente e Radiação Solar Global atingidas durante todo o período experimental

Quadro 36 – Valores médios da Temperatura Ambiente e Radiação Solar Global

	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Temperatura Ambiente média [°C]	15,86	19,12	20,41
Radiação Solar Global média [w/m²]	167,9	229,4	266,7

Por último, como se viu anteriormente, a medição das temperaturas superficiais das amostras foi realizada recorrendo a dois termopares por cada superfície. Sendo a respetiva temperatura a média dos valores registados pelo par de termopares. No Quadro 37 apresenta-se os cálculos do “Coefficient Variation of the Root Mean Square Error” que permite avaliar e quantificar a dispersão entre os valores registados pelos termopares em cada amostra.

Quadro 37 – Valores do “Coefficient Variation of the Root Mean Square Error”

$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - x_t)^2}{n}} \times 100 \quad [\%]$	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Branco [0919]	1,66	*	1,44
Preto [3500-ETICS]	5,87	4,42	1,46
Vermelho [0444]	6,11	3,44	5,36
Wengué [0412]	6,41	7,16	8,80
Preto [3500-Reboco Térmico]	10,96	-	-

$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - x_t)^2}{n}}}{y_t} \times 100 \quad [\%]$	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Preto [3500-Reboco Térmico - “cool pigments”]	2,44	-	-
Preto [3500-ETICS - “cool pigments”]	6,18	-	-
Tijolo [0555]	-	2,33	-
Castanho [0426]	-	1,77	-
Vermelho [0444 - “cool pigments”]	-	8,01	-
Azul [1774]	-	-	2,25
Verde [1436]	-	-	2,65
Pastel [0839]	-	-	2,97

* Não se calculou o RMSE do revestimento Branco [0919] para a 2ª Etapa pois durante as medições um dos termopares danificou-se.

4.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No que respeita às medições da refletância solar “*In Situ*” das amostras e tendo por base os valores do Quadro 26 pode-se concluir que:

- Como seria de esperar, as amostras com revestimento Branco [0919] e Preto [3500 - (ETICS ou Reboco Térmico)] são as que tem menor e maior absorptância solar, respetivamente;
- As amostras cujos revestimentos possuem “cool pigments”, Vermelho [0444] e Preto [3500], possuem menor absorptância solar que as amostras com os mesmos revestimentos sem estes pigmentos. Confirmando-se assim que não se pode deduzir a absorptância solar das amostras apenas por observação da sua cor. De facto, os revestimentos em Preto [3500] com “cool pigments” conseguem ter ainda menor absorptância solar que o Wengué [0412] e o Castanho [0426].

No que respeita às medições “*In Situ*” da temperatura superficial das amostras e tendo por base os valores do Quadro 35 pode-se concluir que:

- As amostras com revestimento Preto [3500] sem “cool pigments” são as que atingem as maiores temperaturas, quando expostas à radiação solar. De facto, o Preto [3500-Reboco Térmico] atinge ainda maiores temperaturas que o Preto [3500-ETICS].
- A amostra que atinge as temperaturas menores é a que possui o revestimento Branco [0919], como seria de esperar;
- As amostras que possuem os “cool pigments” na sua constituição atingem menores temperaturas que as amostras com os mesmos revestimentos sem estes pigmentos, como se pode observar nos gráficos da Fig. 63. De facto, a maior diferença de temperatura verificada entre o Preto [3500-Reboco Térmico] e o Preto [3500-Reboco Térmico - “cool pigments”] é de 11,8 °C, entre o Preto [3500-ETICS] e o Preto [3500-ETICS - “cool pigments”].

pigments”] é de 10,7 °C e entre o Vermelho [0444] e o Vermelho [0444 - “cool pigments”] é de 5,98°C. Por outro lado, os revestimentos em Preto [3500] com “cool pigments” conseguem ainda atingir temperaturas inferiores às do Wengué [0412] e do Castanho [0426], e o Vermelho com “cool pigments” consegue atingir menores temperaturas que o Tijolo [0555].

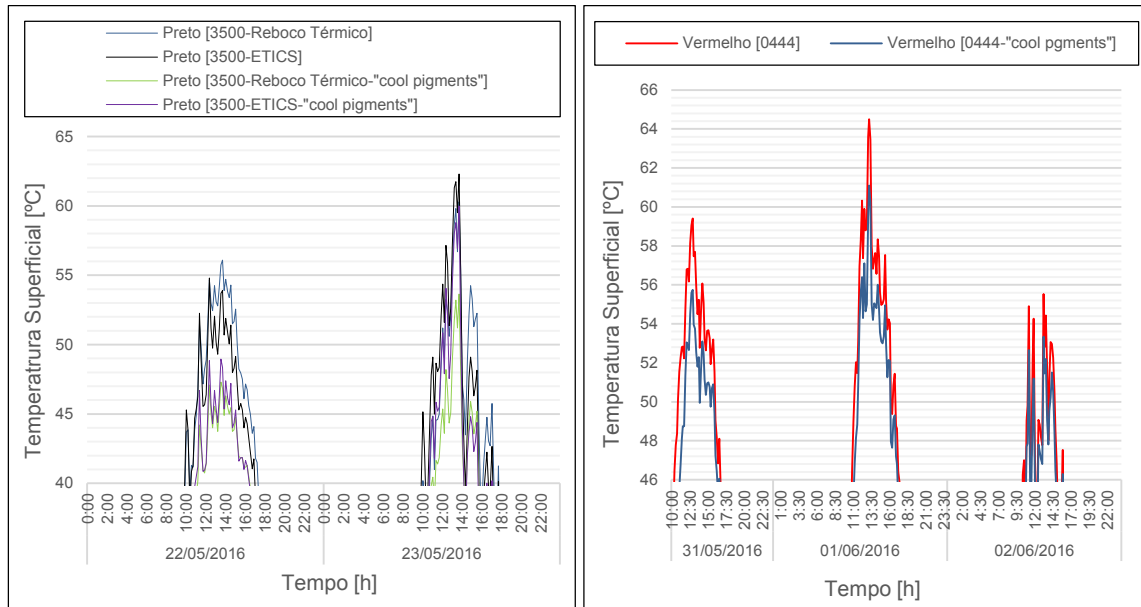


Fig. 63 – Temperaturas das amostras com revestimento Preto [3500] e com revestimento Vermelho [0444]

Com base nos gráficos da Fig. 64, pode-se ainda confirmar a existência de uma relação direta entre a absorvância solar dos revestimentos e as temperaturas superficiais por eles atingidas. De facto, conclui-se que no geral quanto maior a absorvância solar dos revestimentos maiores as temperaturas superficiais por eles atingidas.

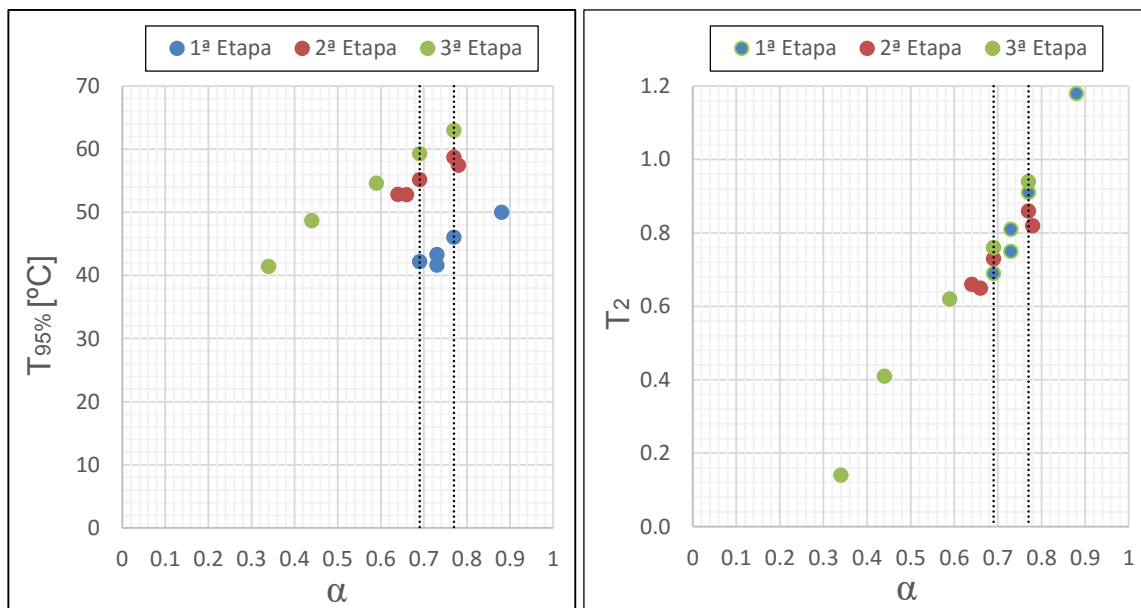


Fig. 64 – Comparação da absorvância solar com o $T_{95\%}$ e com o indicador T_2

5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SÍNTESE CRÍTICA

Atualmente no mercado existem diversos tipos de sistemas de isolamento térmico que podem ser aplicados no exterior das fachadas com o intuito de reduzir as necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios. Sendo dois exemplos destes sistemas habitualmente utilizados: o ETICS e o Sistema com Reboco Térmico. Estes tipos de sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior tornaram-se muito populares devido às suas inúmeras vantagens. No entanto, como se apresentou anteriormente, estes sistemas também possuem algumas desvantagens. Como tal, o estudo realizado no presente trabalho sobre a variação da absorptância solar e das temperaturas superficiais é fundamental para compreender como se comportam diferentes revestimentos destes sistemas quando expostos à radiação solar.

Seguidamente destacam-se as conclusões mais importantes com base no trabalho realizado:

- Nos sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior, como o ETICS e o Sistema com Reboco Térmico, é muito importante saber avaliar as características da camada de revestimento final, uma vez que, é esta camada que vai estar exposta à radiação solar e deve resistir aos agentes atmosféricos. Torna-se assim importante conhecer as suas propriedades pois facilita na seleção do revestimento a ser aplicado. Podem ser aplicados como revestimentos finais destes sistemas: revestimentos minerais coloridos, pintura com tintas, ladrilhos cerâmicos (apresentando algumas restrições) e revestimento plástico espesso (vulgarmente aplicado);
- Como se referiu anteriormente, é importante saber avaliar algumas características destes revestimentos finais, tais como: a refletância e absorptância solar (sendo que um é o complementar do outro). Para a medição destas propriedades térmicas existem alguns métodos normalizados, tais como: a Norma ASTM E903 que mede em laboratório estas propriedades utilizando um espectrofotómetro UV-VIS-NIR, a Norma ASTM C1549 que mede, “*In Situ*” ou em laboratório, a refletância solar recorrendo a um refletómetro solar portátil e a Norma ASTM E1918 que mede “*In Situ*” a refletância solar recorrendo a um piranómetro;
- Apesar de existirem alguns métodos normalizados para a medição da refletância e absorptância solar, no presente trabalho utilizou-se um método alternativo baseado na norma ASTM E1918. Optou-se por este Método Alternativo E1918A pois pretendia-se realizar as medições destas propriedades térmicas das amostras quando expostas à radiação solar. Assim sendo, a Norma ASTM E903 foi descartada pois só permite medições em laboratório, a Norma ASTM E1918 exigia amostras com dimensões muito grandes e a

Norma C1549 só realiza as medições para quatro comprimentos de onda de todo o espectro solar;

- Recorrendo ao método alternativo mediu-se a refletância solar de 11 amostras de ETICS e 2 amostras de Sistema com Reboco térmico com 1m² cada. Como estes ensaios foram realizados com recurso a um piranómetro e quando as amostras se encontram expostas ao sol, então obteve-se a refletância e absortância solar das amostras para todo o espectro solar. Como se viu no estado da arte, se as medições destas propriedades não forem realizadas para todo o espectro solar introduzem-se erros significativos. A título de exemplo, a medição da refletância no espectro visível para duas amostras da mesma cor, sendo que uma delas apresenta “cool pigments”, vão apresentar refletâncias semelhantes pois estes pigmentos especiais aumentam a refletância solar na gama do infravermelho. De facto, medindo essas amostras para o espectro solar, a que possui os “cool pigments” deverá registar maior refletância solar;
- Após a realização dos ensaios “*In Situ*” para a determinação da refletância solar das amostras, cujos revestimentos não possuem pigmentos especiais, verificou-se que quanto mais escura a sua cor menor a refletância solar. Variando entre os 12% para os revestimentos em Preto e os 73% para os revestimentos em Branco. No entanto, quando se analisam as amostras com “cool pigments” verificou-se que possuem maior refletância solar que as amostras da mesma cor sem estes pigmentos especiais, que visualmente são exatamente iguais. De facto, com a introdução destes “cool pigments” registou-se um aumento de 15% na refletância solar das amostras em Preto e de 3% nas amostras em Vermelho. Comprovando-se assim que não se pode avaliar esta propriedade térmica apenas por observação visual, como anteriormente se previa. Têm-se ainda a título de exemplo do efeito benéfico destes pigmentos especiais, o revestimento Preto com “cool pigments” que consegue ter uma refletância solar de 27% que é maior que a refletância dos revestimentos em Castanho (22%) e Wengué (23%);
- Os ensaios “*In Situ*” realizados para avaliar as temperaturas superficiais das amostras foram divididos em três etapas de medição. Em cada etapa mediu-se sete amostras em simultâneo, recorrendo-se a dois termopares de tipo T por amostra e manteve-se em cada etapa quatro amostras comuns. Como nas diferentes etapas as condições climáticas eram diferentes então recorreu-se a estas amostras comuns que serviam como referência e possibilitavam posteriormente a comparação das temperaturas registadas. Para essa comparação de valores utilizaram-se dois indicadores (T_1 e T_2).
- O indicador T_2 foi considerado como o mais aconselhado para realizar essas comparações de valores entre etapas diferentes. No que respeita aos revestimentos sem pigmentos especiais registaram-se as maiores temperaturas na amostra de Sistema com Reboco Térmico em Preto ($T_{2,50\%} = 1,18$) seguido pela amostra de ETICS em Preto (amostra de referência). As menores temperaturas foram registadas pela amostra de ETICS com revestimento Branco (amostra de referência) seguida pela amostra de ETICS com revestimento em Pastel ($T_{2,50\%} = 0,15$). Nos valores das temperaturas superficiais registados também foi visível o efeito da utilização de “cool pigments” nos revestimentos finais. De facto, nas amostras com “cool pigments” registaram-se temperaturas superficiais inferiores às das amostras da mesma cor sem esses pigmentos especiais. No caso das amostras com revestimento normal em Preto em relação às com “cool pigments”, registou-se no pico de calor diferenças que chegaram a ultrapassar os 10°C. Nas amostras em Vermelho as diferenças de temperatura chegaram a ultrapassar os 5°C. Por outro lado, em todas as etapas

verificou-se que no período noturno as temperaturas superficiais das amostras eram todas próximas e inferiores à temperatura ambiente.

- Após a análise dos resultados experimentais das medições “*In Situ*” da refletância solar e das temperaturas superficiais confirmou-se ainda a existência de uma relação direta entre eles. De facto, conclui-se que no geral quanto maior a absorptância solar dos revestimentos maiores as temperaturas superficiais por eles atingidas.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No que respeita a este campo de investigação existe ainda várias vertentes possíveis de se desenvolver, além do aprofundado no presente trabalho. Como tal, apresenta-se seguidamente algumas dessas vertentes de maior relevância que podem ser desenvolvidas no futuro:

- No que respeita às medições da refletância e absorptância solar podem ainda ser realizados ensaios em laboratório recorrendo ao método normalizado ASTM E903. Uma vez que este método é considerado como o mais preciso permitia assim avaliar-se as diferenças existentes em relação ao Método Alternativo E1918A utilizado;
- Avaliar o efeito que o envelhecimento devido aos agentes atmosféricos introduz na absorptância das amostras utilizando ambos os métodos, Método Alternativo E1918A e Método ASTM E903;
- Avaliar o efeito que a rugosidade dos revestimentos superficiais das amostras introduz na sua absorptância solar;
- Analisar mais pormenorizadamente a composição química e o comportamento dos revestimentos com “cool pigments”;
- Medir as temperaturas superficiais todas numa única etapa de medições e por um período mais extenso de tempo;
- Realizar o mesmo tipo ensaios experimentais, mas para outros tipos de revestimentos possíveis de serem aplicados nestes sistemas de isolamento térmico de fachadas pelo exterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADCON TELEMETRY, Pyranometer LP02. Disponível em:
http://www.adcon.at/index.php?option=com_hikashop&ctrl=product&task=show&cid=301&name=pyranometer-lp02&Itemid=220&lang=en. Data de acesso: 17/02/2016.
- AKBARI, H.; LEVINSON, R.; BERDAHL, P. (1996). "ASTM standards for measuring solar reflectance and infrared emittance of construction materials and comparing their steady-state surface temperatures". Proceedings of the 1996 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Vol. 1, p. 1, Pacific Grove, EUA.
- AKBARI, H.; LEVINSON, R.; STERN, S. (2008). "Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies". Solar Energy 82(7): 648-655.
- ANACLETO, A. (2007). "Temperatura e sua medição". Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- ASTM (2012a). "ASTM E230 / E230M-12: Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EUA.
- ASTM (2012b). "ASTM E903-12: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EUA.
- ASTM (2012c). "ASTM G173-03 (2012): Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EUA.
- ASTM (2014). "ASTM C1549-09 (2014): Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EUA.
- ASTM (2015). "ASTM E1918-06 (2015): Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EUA.
- BARREIRA, E. (2012). "Degradação biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico". Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S.; INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. (2011). "Fundamentals of Heat and Mass Transfer". Wiley, EUA.
- BERNARDES, C. (1998). "Qualidade e o custo das não-conformidades em obras de construção civil". PINI Editora. São Paulo, Brasil.
- BRETZ, S.E.; AKBARI, H. (1997). "Long-term performance of high-albedo roof coatings". Energy and Buildings, 25(2): 159-167.
- BROOKS, D.R. (2008). "Bringing the Sun Down to Earth: Designing Inexpensive Instruments for Monitoring the Atmosphere". Springer, Nova Iorque, EUA.

- CALEX, Electronics Limited (2008). *"Low Cost Handheld Infrared Thermometer ST640 Series"*. Disponível em: <http://www.calex.co.uk/product/temperature-measurement/handheld-infrared-thermometers/st640-series/>. Data de acesso: 22/03/2016.
- CASTRO, A. (2002). *"Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica"*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- ÇENGEL, Y.A. (2007). *"Heat and mass transfer: a practical approach"*. McGraw-Hill, Nova Iorque, EUA.
- CHEW, M.Y.L. (1992). *"The study of adhesion failure of wall tiles"*. Building and Environment, 27(4): 493-499.
- CRRC, Cool Roof Rating Council (2015). *"Product Rating Program CRRC-1"*. Disponível em: http://coolroofs.org/documents/CRRC-1_Program_Manual_-_2015-11-19_Final.pdf. Data de acesso: 15/03/2016.
- CTCV, Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (2012). *"Estudo do Comportamento Térmico das Coberturas com Telhas Cerâmicas"*.
- D&S, Devices and Services Company (2009). *"Solar Spectrum Reflectometer Model SSR-ER version 6"*. Disponível em: <http://devicesandservices.com/prod01.htm>. Data de acesso: 17/02/2016.
- DELTA-T DEVICES, SPN1 Sunshine Pyranometer. Disponível em: <http://www.delta-t.co.uk/product-display.asp?id=SPN1%20Product&div=Meteorology%20and%20Solar>. Data de acesso: 03/03/2016.
- DORNELLES, K.A. (2008). *"Solar absorptance of opaque surfaces: a determination methods and data base for latex acrylic and PVA coatings"*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- DORNELLES, K.A.; SICHIERI, E. (2014). *"Efeitos do intemperismo natural sobre a refletância de tintas brancas para coberturas"*. In XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014. Maceió, Brasil.
- EOTA, European Organisation for Technical Approvals (2013). *"Guideline for european technical approval of external thermal insulation composite systems (ETICS) with rendering"*, ETAG n.º004. Bruxelas, Bélgica.
- FERNANDES, C.; BRITO, J. ; CRUZ, C. (2016). *"Architectural integration of ETICS in building rehabilitation"*. Journal of Building Engineering, 5: 178-184.
- FERREIRA, F.; PRADO, R. (2003). *"Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil"*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, Brasil.
- FIALHO, A.B. (2002). *"Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises"*. Érica. São Paulo, Brasil.
- FIORITO, A.J.S.I. (1994). *"Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução"*. PINI Editora. São Paulo, Brasil.
- FREITAS, V.P. (2002). *"Isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Reboco delgado armado sobre poliestireno expandido - ETICS"*. Prof. Eng. Vasco Peixoto de Freitas, Lda - Relatório HT 191A/02. Porto, Portugal.


- GUIMARÃES, L.; PEREIRA, C.; OLIVEIRA, K.; CARASEK, H. (2002). *"Acompanhamento das variações das temperaturas superficiais dos principais materiais utilizados em fachadas"*. In 2º Encontro sobre pesquisa de materiais de construção. Universidade Federal de Goiás. Goiás, Brasil.
- GÜTHS, S.; PAULO, V. (1998). *"Instrumentação em Ciências Térmicas"*. Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, Brasil.
- HARRISON, G. (2015). *"Meteorological Measurements and Instrumentation"*. Wiley. Chichester, Reino Unido.
- HUKSEFLUX, Thermal Sensors - Pyranometer products. Disponível em: http://www.hukseflux.com/product_group/pyranometer. Data de acesso: 22/04/2016.
- HUKSEFLUX, SRA01 Albedometer - Albedo Measurement. Disponível em: http://www.hukseflux.com/product/sra01-albedometer?referrer=/product_group/pyranometer. Data de acesso: 02/03/2016.
- HUKSEFLUX, *"User manual SR05 - Digital second class pyranometer"*. Disponível em: http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_manual/SR05_manual_v1609.pdf. Data de acesso: 22/04/2016.
- HUKSEFLUX, Thermal Sensors (2012). *"ISO-9060 Standard & Pyranometer Measurement Accuracy"*. In World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen.
- IPQ, Instituto Português da Qualidade (2011). *"NP EN 15824 - Especificações para rebocos exteriores e interiores com base em ligantes orgânicos"*.
- ISO, International Organization for Standardization. (1990). *"ISO 9060:1990 - Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation"*.
- KIPP&ZONEN (2015). *"The Working Principle of a Thermopile Pyranometer"*. Disponível em: <http://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer#.VtbEMpyLShe>. Data de acesso: 02/03/2016.
- LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P. (2010a). *"Measuring solar reflectance - Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain"*. Solar Energy, 84(9): 1717-1744.
- LEVINSON, R.; AKBARI, H.; BERDAHL, P. (2010b) *"Measuring solar reflectance - Part II: Review of practical methods"*. Solar Energy, 84(9): 1745-1759.
- LFC, Laboratório de Física das Construções (2009). *"Estação Meteorológica da FEUP/LFC"*. Disponível em: <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/>. Data de aceso: 26/04/2016.
- LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2011). *"ETA 11/0287 - Aprovação Técnica Europeia do Sistema Weber.Therm Classic"*.
- MARINOSKI, D.; ORIGE, L.; GUESSER, A.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. (2013). *"Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório"*. In XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Brasília, Brasil.

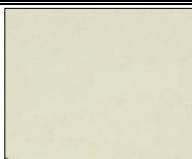
- MARQUES, D. (2014). *"Avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios – Estudo de caso através da análise numérica e por termografia infravermelha"*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- MATOS, V.; LIMA, M. (2006). *"Manual para avaliação de fachadas – importância da avaliação dos fatores ambientais de degradação"*. In XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Florianópolis, Brasil.
- OCAÑA, S.; GUERRERO, I.; REQUENA, I. (2004). *"Thermographic survey of two rural buildings in Spain"*. Energy and Buildings, 36(6): 515-523.
- PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; CABEZA, L.; GRANQVIST, C. (2015). *"Eco-efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs: Design, Properties and Applications"*. Wood Head Publication, Reino Unido.
- PAES, I.; CARASEK, H. (2002). *"Desempenho das argamassas de rejuntamento e da junta de assentamento no comportamento térmico do sistema de revestimento cerâmico"*. In IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). Paraná, Brasil.
- PEDROSA, I. (2009). *"Da cor à cor inexistente"*. São Paulo, Brasil.
- PEREIRA, C.P. (2000). *"A cor no desenho industrial: fundamentos para o projeto cromático de produtos"*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- PEREIRA, C.; MARINOSKI, D.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S.; GHISI, E. (2015). *"Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas"*. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.
- PERKIN ELMER, LAMBDA 750 UV/Vis/NIR Spectrophotometer. Disponível em: <http://www.perkinelmer.com/product/lambda-750-uv-vis-nir-spectrophotometer-l750>. Data de acesso: 17/02/2016.
- RADHI, H.; ASSEM, E.; SHARPLES, S. (2014). *"On the colours and properties of building surface materials to mitigate urban heat islands in highly productive solar regions"*. Building and Environment, 72: 162-172.
- SATO, N.; LOH, K.; SILVA, I. (2012). *"Caracterização da refletância de superfícies externas de coberturas e paredes"*. In XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora, Brasil.
- SEKER, D.; TAVIL, A. (1996). *"Evaluation of exterior building surface roughness degrees by photogrammetric methods"*. Building and Environment, 31(4): 393-398.
- SILVA, D. (2012). *"Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia"*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- TECHNOLOGIES, Chromaflo (2014). *"Novapint D Solar Reflective"*. Disponível em: <http://www.chromaflo.com/Chromaflo/files/18/1812618a-288f-4dd9-a2f3-bcaaa37d9700.pdf>. Data de aceso: 25/05/2016.
- THOMAZ, E. (1989). *"Trincas de edificios: causas, prevenção e recuperação"*. Pini Editora. São Paulo, Brasil.


- UEMOTO, K.L.; SATO, N.; JOHN, V. (2010). *"Estimating thermal performance of cool colored paints"*. Energy and Buildings, 42(1): 17-22.
- VIGNOLA, F.; MICHALSKY, J.; STOFFEL, T. (2012). *"Solar and Infrared Radiation Measurements"*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- WEBER, Saint-Gobain (2015). "O guia 2015 WEBER".


ANEXOS


FICHAS DE ENSAIO EXPERIMENTAL


Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Branco [0919]								
I_H [w/m ²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	13,963 1117,0	mA w/m ²	2º)	12,901 1032,1	mA w/m ²	3º)	13,485 1078,8	mA w/m ²
I_1 [w/m ²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	9,340 742,20	mA w/m ²	2º)	9,108 728,64	mA w/m ²	3º)	9,133 730,64	mA w/m ²
I_2 [w/m ²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	5,470 437,60	mA w/m ²	2º)	5,386 430,88	mA w/m ²	3º)	5,386 430,88	mA w/m ²
I_3 [w/m ²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	8,449 675,92	mA w/m ²	2º)	8,335 666,8	mA w/m ²	3º)	8,346 667,68	mA w/m ²
I'_H [w/m ²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	13,740 1099,2	mA w/m ²	2º)	13,141 1051,3	mA w/m ²	3º)	13,330 1066,4	mA w/m ²
$ I'_H - I_H $ [w/m ²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m ² repetir as medições anteriores	17,84			19,2			12,4		
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,716	w/m ²	2º)	0,734	w/m ²	3º)	0,732	w/m ²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,73			α			0,27		


Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Pastel [0839]								
I_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	11,168	mA	2º)	11,955	mA	3º)	12,379	mA
		893,44	w/m²		956,4	w/m²		990,32	w/m²
I_1 [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	9,074	mA	2º)	9,079	mA	3º)	9,555	mA
		752,92	w/m²		726,32	w/m²		764,40	w/m²
I_2 [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	6,681	mA	2º)	6,853	mA	3º)	6,972	mA
		534,48	w/m²		548,24	w/m²		557,76	w/m²
I_3 [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	8,365	mA	2º)	8,404	mA	3º)	8,744	mA
		669,2	w/m²		672,32	w/m²		699,52	w/m²
I'_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	11,417	mA	2º)	12,190	mA	3º)	12,201	mA
		913,36	w/m²		975,2	w/m²		976,08	w/m²
$ I'_H - I_H $ [w/m²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m² repetir as medições anteriores	19,92			18,80			14,24		
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,663	w/m²	2º)	0,657	w/m²	3º)	0,649	w/m²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,66			α			0,34		


Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Azul [1774]								
I_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,464	mA	2º)	11,263	mA	3º)	10,713	mA
		997,12	w/m²		901,04	w/m²		857,04	w/m²
I_1 [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	9,487	mA	2º)	8,729	mA	3º)	8,237	mA
		758,96	w/m²		698,32	w/m²		658,96	w/m²
I_2 [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	7,144	mA	2º)	6,523	mA	3º)	6,228	mA
		571,52	w/m²		521,84	w/m²		498,24	w/m²
I_3 [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	8,473	mA	2º)	7,764	mA	3º)	7,390	mA
		677,84	w/m²		621,12	w/m²		591,20	w/m²
I'_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,215	mA	2º)	11,015	mA	3º)	10,728	mA
		977,20	w/m²		881,20	w/m²		858,24	w/m²
$ I'_H - I_H $ [w/m²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m² repetir as medições anteriores	19,92			19,84			1,20		
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,554	w/m²	2º)	0,550	w/m²	3º)	0,563	w/m²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,56			α			0,44		

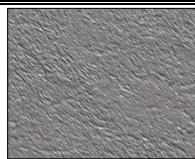
Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Verde [1436]								
I_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,461	mA	2º)	12,853	mA	3º)	13,003	mA
		996,88	w/m²		1028,2	w/m²		1040,2	w/m²
I_1 [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	9,640	mA	2º)	10,034	mA	3º)	10,093	mA
		771,20	w/m²		802,72	w/m²		807,44	w/m²
I_2 [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	7,080	mA	2º)	7,341	mA	3º)	7,223	mA
		566,40	w/m²		587,28	w/m²		577,84	w/m²
I_3 [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	8,094	mA	2º)	8,414	mA	3º)	8,296	mA
		647,52	w/m²		673,12	w/m²		663,68	w/m²
I'_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,446	mA	2º)	13,040	mA	3º)	13,214	mA
		995,68	w/m²		1043,2	w/m²		1057,1	w/m²
$ I'_H - I_H $ [w/m²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m² repetir as medições anteriores	1,20			14,96			16,88		
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,417	w/m²	2º)	0,419	w/m²	3º)	0,399	w/m²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,41			α			0,59		

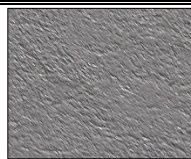
Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Castanho [0426]								
I _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	13,682	mA	2º)	13,736	mA	3º)	13,904	mA
		1094,6	w/m²		1098,9	w/m²		1112,3	w/m²
I ₁ [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	8,734	mA	2º)	8,793	mA	3º)	8,833	mA
		698,72	w/m²		703,44	w/m²		706,64	w/m²
I ₂ [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	5,258	mA	2º)	5,184	mA	3º)	5,174	mA
		420,64	w/m²		414,72	w/m²		413,92	w/m²
I ₃ [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	5,711	mA	2º)	5,770	mA	3º)	5,746	mA
		456,88	w/m²		461,60	w/m²		459,68	w/m²
I' _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	13,810	mA	2º)	13,918	mA	3º)	13,973	mA
		1104,8	w/m²		1113,4	w/m²		1117,8	w/m²
I' _H - I _H [w/m²] Se I' _H - I _H > 20 w/m² repetir as medições anteriores	10,24		14,56			5,52			
R _t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,204	w/m²	2º)	0,223	w/m²	3º)	0,225	w/m²
R _{t, médio}	0,22		α			0,78			


Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Tijolo [0555]								
I_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	11,604	mA	2º)	11,718	mA	3º)	12,023	mA
		928,32	w/m²		937,44	w/m²		961,84	w/m²
I_1 [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	7,754	mA	2º)	7,730	mA	3º)	7,749	mA
		620,32	w/m²		618,40	w/m²		619,92	w/m²
I_2 [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	4,756	mA	2º)	4,790	mA	3º)	4,761	mA
		380,48	w/m²		383,20	w/m²		380,88	w/m²
I_3 [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	5,696	mA	2º)	5,726	mA	3º)	5,741	mA
		455,68	w/m²		457,28	w/m²		459,28	w/m²
I'_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	11,792	mA	2º)	11,958	mA	3º)	12,141	mA
		943,36	w/m²		956,64	w/m²		971,28	w/m²
$ I'_H - I_H $ [w/m²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m² repetir as medições anteriores	15,04		19,20			9,44			
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,351	w/m²	2º)	0,352	w/m²	3º)	0,362	w/m²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,36		α			0,64			

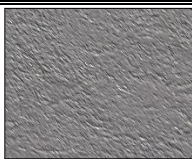
Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	“Wengué” [0412]								
I _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,212	mA	2º)	12,363	mA	3º)	12,565	mA
		976,96	w/m²		989,04	w/m²		1005,2	w/m²
I ₁ [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	9,261	mA	2º)	9,074	mA	3º)	9,079	mA
		740,88	w/m²		725,92	w/m²		726,32	w/m²
I ₂ [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	6,602	mA	2º)	6,011	mA	3º)	6,115	mA
		528,16	w/m²		480,88	w/m²		489,20	w/m²
I ₃ [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	7,036	mA	2º)	6,509	mA	3º)	6,645	mA
		562,88	w/m²		520,72	w/m²		531,6	w/m²
I' _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,432	mA	2º)	12,171	mA	3º)	12,336	mA
		994,56	w/m²		973,68	w/m²		968,88	w/m²
I' _H - I _H [w/m²] Se I' _H - I _H > 20 w/m² repetir as medições anteriores	17,6			15,36			18,32		
R _t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,231	w/m²	2º)	0,230	w/m²	3º)	0,243	w/m²
R _{t, médio}	0,23			α			0,77		

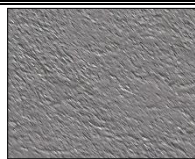
Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Vermelho [0444]								
I_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	9,852	mA	2º)	9,901	mA	3º)	9,857	mA
		788,16	w/m²		792,08	w/m²		788,56	w/m²
I_1 [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	7,420	mA	2º)	7,488	mA	3º)	7,538	mA
		593,60	w/m²		599,04	w/m²		603,04	w/m²
I_2 [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	4,495	mA	2º)	4,515	mA	3º)	4,525	mA
		359,60	w/m²		361,20	w/m²		362,00	w/m²
I_3 [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	5,411	mA	2º)	5,421	mA	3º)	5,435	mA
		432,88	w/m²		433,68	w/m²		434,80	w/m²
I'_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	9,866	mA	2º)	9,832	mA	3º)	10,004	mA
		789,28	w/m²		786,56	w/m²		800,32	w/m²
$ I'_H - I_H $ [w/m²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m² repetir as medições anteriores	1,12			5,52			11,76		
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,319	w/m²	2º)	0,313	w/m²	3º)	0,311	w/m²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,31			α			0,69		

Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Preto [3500-ETICS]								
I_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	10,104	mA	2º)	10,374	mA	3º)	10,182	mA
		808,32	w/m²		829,92	w/m²		814,56	w/m²
I_1 [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	7,272	mA	2º)	7,365	mA	3º)	7,415	mA
		581,76	w/m²		598,20	w/m²		593,20	w/m²
I_2 [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	4,539	mA	2º)	4,643	mA	3º)	4,653	mA
		363,12	w/m²		371,44	w/m²		372,24	w/m²
I_3 [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	4,598	mA	2º)	4,731	mA	3º)	4,702	mA
		367,84	w/m²		378,48	w/m²		376,16	w/m²
I'_H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	10,349	mA	2º)	10,196	mA	3º)	10,251	mA
		827,92	w/m²		815,68	w/m²		820,08	w/m²
$ I'_H - I_H $ [w/m²] Se $ I'_H - I_H > 20$ w/m² repetir as medições anteriores	19,60			14,24			5,52		
R_t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,115	w/m²	2º)	0,123	w/m²	3º)	0,112	w/m²
$R_{t, \text{ médio}}$	0,12			α			0,88		

Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Preto [3500-ETICS – “cool pigments”]								
I _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,510	mA	2º)	12,732	mA	3º)	12,904	mA
		1000,8	w/m²		1018,6	w/m²		1032,3	w/m²
I ₁ [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	8,394	mA	2º)	8,414	mA	3º)	8,439	mA
		671,52	w/m²		673,12	w/m²		675,12	w/m²
I ₂ [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	4,805	mA	2º)	4,810	mA	3º)	4,830	mA
		384,40	w/m²		384,80	w/m²		386,40	w/m²
I ₃ [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	5,568	mA	2º)	5,573	mA	3º)	5,588	mA
		445,44	w/m²		445,84	w/m²		447,04	w/m²
I' _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,750	mA	2º)	12,949	mA	3º)	12,770	mA
		1020,0	w/m²		1035,9	w/m²		1021,6	w/m²
I' _H - I _H [w/m²] Se I' _H - I _H > 20 w/m² repetir as medições anteriores	19,20			17,36			10,72		
R _t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,270	w/m²	2º)	0,269	w/m²	3º)	0,268	w/m²
R _t , médio	0,27			α			0,73		

Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Vermelho [0444 - “cool pigments”]								
I _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	13,899	mA	2º)	13,613	mA	3º)	13,854	mA
		1111,9	w/m²		1089,0	w/m²		1108,3	w/m²
I ₁ [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	8,892	mA	2º)	8,734	mA	3º)	8,946	mA
		711,36	w/m²		698,72	w/m²		715,68	w/m²
I ₂ [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	5,155	mA	2º)	5,110	mA	3º)	5,145	mA
		412,4	w/m²		408,80	w/m²		411,60	w/m²
I ₃ [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	6,282	mA	2º)	6,203	mA	3º)	6,263	mA
		502,56	w/m²		496,24	w/m²		501,04	w/m²
I' _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	13,914	mA	2º)	13,741	mA	3º)	13,751	mA
		1113,1	w/m²		1099,3	w/m²		1100,1	w/m²
I' _H - I _H [w/m²] Se I' _H - I _H > 20 w/m² repetir as medições anteriores	1,20			10,24			8,24		
R _t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,341	w/m²	2º)	0,341	w/m²	3º)	0,335	w/m²
R _{t, médio}	0,34			α			0,66		

Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Preto [3500-Reboco Térmico]								
I _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,693	mA	2º)	12,496	mA	3º)	13,077	mA
		1015,4	w/m²		999,68	w/m²		1046,2	w/m²
I ₁ [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	8,197	mA	2º)	8,458	mA	3º)	8,557	mA
		655,76	w/m²		676,64	w/m²		684,56	w/m²
I ₂ [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	4,933	mA	2º)	5,020	mA	3º)	5,056	mA
		394,64	w/m²		401,60	w/m²		404,48	w/m²
I ₃ [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	5,061	mA	2º)	5,135	mA	3º)	5,125	mA
		404,88	w/m²		410,80	w/m²		410,00	w/m²
I' _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,614	mA	2º)	12,658	mA	3º)	12,963	mA
		1009,1	w/m²		1012,6	w/m²		1037,0	w/m²
I' _H - I _H [w/m²] Se I' _H - I _H > 20 w/m² repetir as medições anteriores	6,32			12,96			9,12		
R _t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,131	w/m²	2º)	0,127	w/m²	3º)	0,116	w/m²
R _t , médio	0,12			α			0,88		

Medição da Refletância Solar “In Situ” segundo o Método Alternativo E1918A									
Amostra	Preto [3500-Reboco Térmico - “cool pigments”]								
I _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,220	mA	2º)	12,496	mA	3º)	12,489	mA
		977,60	w/m²		999,68	w/m²		999,12	w/m²
I ₁ [w/m²]	Irradiância solar da máscara branca opaca								
	1º)	8,010	mA	2º)	8,158	mA	3º)	8,178	mA
		640,8	w/m²		652,64	w/m²		654,24	w/m²
I ₂ [w/m²]	Irradiância solar da máscara preta opaca								
	1º)	4,810	mA	2º)	4,879	mA	3º)	4,845	mA
		384,80	w/m²		390,32	w/m²		387,60	w/m²
I ₃ [w/m²]	Irradiância solar da amostra								
	1º)	5,509	mA	2º)	5,568	mA	3º)	5,554	mA
		440,72	w/m²		445,44	w/m²		444,32	w/m²
I' _H [w/m²]	Irradiância Solar Total incidente numa superfície horizontal								
	1º)	12,450	mA	2º)	12,505	mA	3º)	12,629	mA
		996,00	w/m²		1000,4	w/m²		1010,3	w/m²
I' _H - I _H [w/m²] Se I' _H - I _H > 20 w/m² repetir as medições anteriores	18,40			0,72			11,2		
R _t	$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$								
	1º)	0,275	w/m²	2º)	0,268	w/m²	3º)	0,270	w/m²
R _t , médio	0,27			α			0,73		